



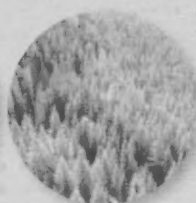
Ressources naturelles
Canada

Natural Resources
Canada



SUIVI DES EFFETS DES CHANGEMENTS CLIMATIQUES

Indicateurs potentiels pour les forêts
et le secteur forestier du Canada



Canada



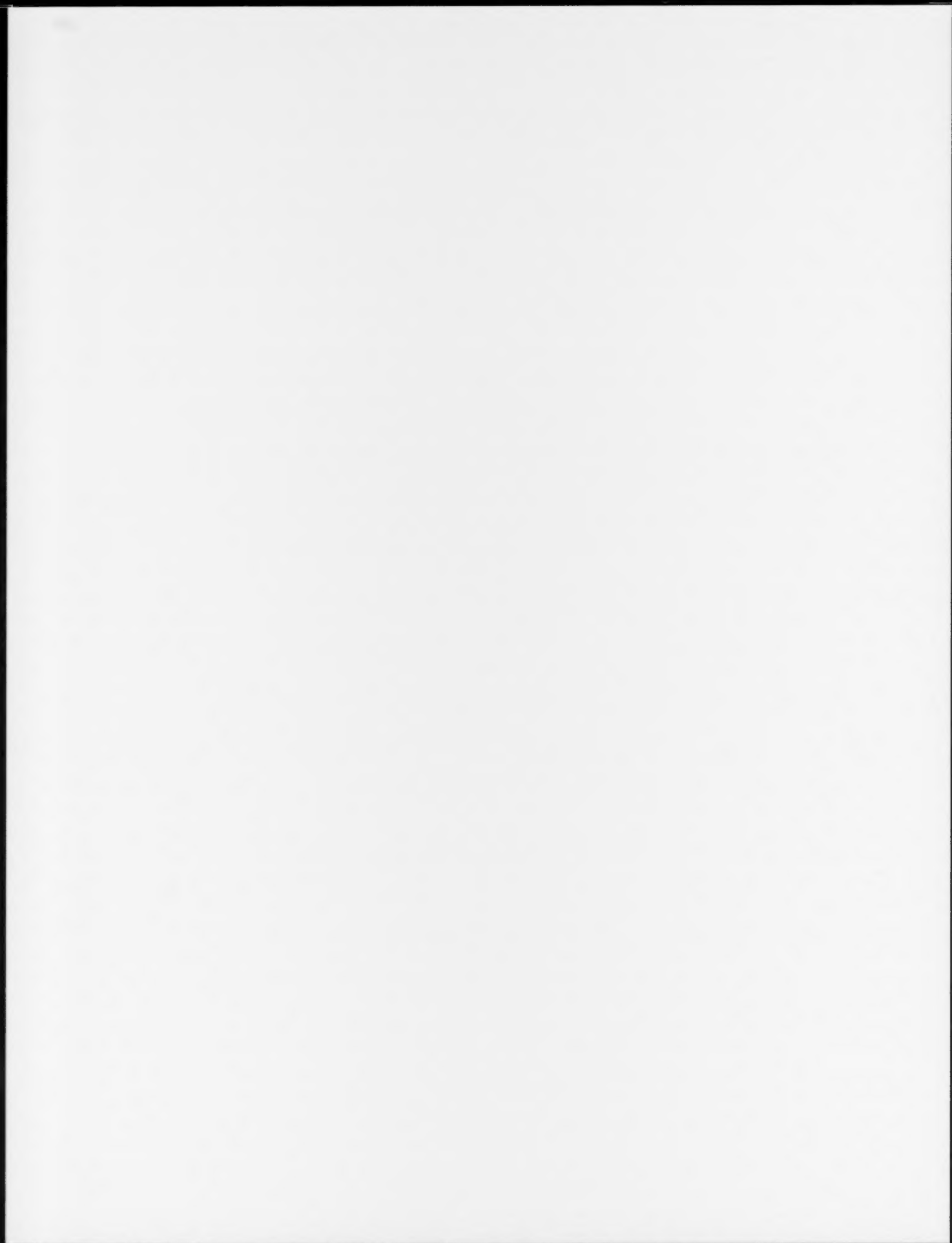
Ressources naturelles
Canada

Natural Resources
Canada

SUIVI DES EFFETS DES CHANGEMENTS CLIMATIQUES

Indicateurs potentiels pour les forêts
et le secteur forestier du Canada

Canada



SUIVI DES EFFETS DES CHANGEMENTS CLIMATIQUES

Indicateurs potentiels pour les forêts
et le secteur forestier du Canada

Sylvie Gauthier¹, Miren Lorente¹, Laurie Kremsater², Louis De Grandpré¹,
Philip J. Burton³, Isabelle Aubin⁴, Edward H. Hogg⁵, Solange Nadeau⁶,
Elizabeth A. Nelson⁷, Anthony R. Taylor⁶ et Catherine Ste-Marie⁷

¹ Ressources naturelles Canada, Service canadien des forêts, Centre de foresterie des Laurentides, 1055, rue du P.E.P.S., C.P. 10380, succ. Sainte-Foy, Québec (Québec) G1V 4C7

² Consultante en écologie forestière, 28360 Starr Road, Abbotsford (Colombie-Britannique) V4X 2C5

³ Anciennement, Ressources naturelles Canada, Service canadien des forêts, Centre de foresterie du Pacifique, 506 West Burnside Road, Victoria (Colombie-Britannique) V8Z 1M5; actuellement, University of Northern British Columbia, 4837 Keith Avenue, Terrace (Colombie-Britannique) V8G 1K7

⁴ Ressources naturelles Canada, Service canadien des forêts, Centre de foresterie des Grands Lacs, 1219 Queen Street East, PO Box 490, Sault Ste. Marie (Ontario) P6A 2E5

⁵ Ressources naturelles Canada, Service canadien des forêts, Centre de foresterie du Nord, 5320-122nd Street NW, Edmonton (Alberta) T6H 3S5

⁶ Ressources naturelles Canada, Service canadien des forêts, Centre de foresterie de l'Atlantique, 1350, rue Regent Sud, C.P. 4000, Fredericton (Nouveau-Brunswick) E3B 5P7

⁷ Ressources naturelles Canada, Service canadien des forêts, 580, rue Booth, Ottawa (Ontario) K1A 0E4

©Sa Majesté la Reine du Chef du Canada, représentée par le ministre de Ressources naturelles Canada, 2014
Numéro de cat. : Fo4-47/2014F-PDF
ISBN 978-0-660-21502-0

This publication is available in English under the title *Tracking climate change effects: potential indicators for Canada's forests and forest sector*

Conception graphique et mise en page : Sandra Bernier

Catalogage avant publication de Bibliothèque et Archives Canada

Gauthier, Sylvie, 1961 –

Suivi des effets des changements climatiques : indicateurs potentiels pour les forêts et le secteur forestier du Canada / Sylvie Gauthier, Miren Lorente, Laurie Kremsater, Louis De Grandpré, Philip J. Burton, Isabelle Aubin, Edward H. Hogg, Solange Nadeau, Elizabeth A. Nelson, Anthony R. Taylor et Catherine Ste-Marie.

Publié aussi en anglais sous le titre : *Tracking climate change effects: potential indicators for Canada's forests and forest sector*.

Monographie électronique en format PDF.

Publié par : Direction du programme des sciences.

Comprend des références bibliographiques.

ISBN 978-0-660-21502-0

No de cat. : Fo4-47/2014F-PDF

1. Foresterie—Facteurs climatiques—Canada.

2. Forêts--Surveillance—Canada.

3. Sylviculture—Aspect de l'environnement—Canada.

I. Service canadien des forêts

II. Service canadien des forêts. Direction du programme des sciences

III. Titre.

SD387 E58 G3814 2013333.750971C2013-980104-9

Le contenu de cette publication peut être reproduit en tout ou en partie, et par quelque moyen que ce soit, sous réserve que la reproduction soit effectuée uniquement à des fins personnelles ou publiques, mais non commerciales, sans frais ni autre permission, à moins d'avis contraires.

On demande seulement :

- de faire preuve de diligence raisonnable en assurant l'exactitude du matériel reproduit;
- d'indiquer le titre complet du matériel reproduit et l'organisation qui en est l'auteur;
- d'indiquer que la reproduction est une copie d'un document officiel publié par Ressources naturelles Canada et que la reproduction n'a pas été faite en association avec Ressources naturelles Canada ni avec l'appui de celui-ci.

La reproduction et la distribution à des fins commerciales sont interdites, sauf avec la permission écrite de Ressources naturelles Canada. Pour de plus amples renseignements, veuillez communiquer avec Ressources naturelles Canada à droitdauteur.copyright@nrcan-nrcan.gc.

Crédits photographiques

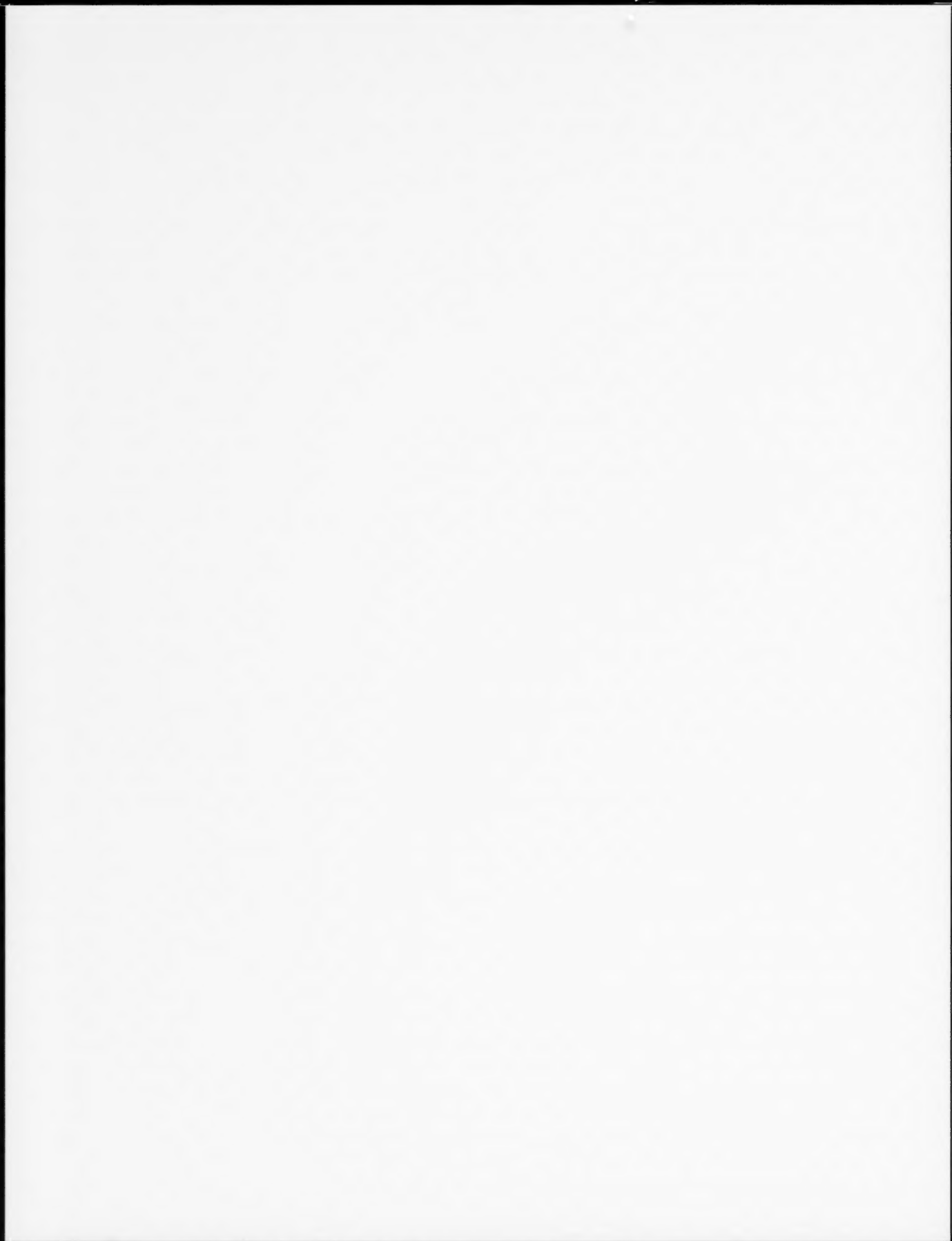
Couverture : Photo à gauche, ©iStock/Videowok-art, et p. 19 (arrière-plan), photo à droite, ©iStock/SlowRunning, et p. 55 (arrière-plan). **Figure 2** : Perturbations naturelles, et p. 25 (en bas et au centre), et p. 30, Société de protection des forêts contre le feu; Phénologie des espèces (en haut et au centre), Benoît Hamel; Répartition et abondance des espèces, et p. 25 (en haut et à gauche), et p. 41, Philip J. Burton; Dynamique des peuplements forestiers (arrière-plan), et p. 25 (en haut et au centre), et p. 47, Danielle Charron, Université du Québec à Montréal; Conditions et processus édaphiques, et p. 25 (en haut et à droite), et p. 52, Philip J. Burton; Dimensions humaines liées à la forêt (en médaillon), Philip J. Burton.

Comment citer cette publication :

Gauthier, S.; Lorente, M.; Kremsater, L.; De Grandpré, L.; Burton, P.J.; Aubin, I.; Hogg, E.H.; Nadeau, S.; Nelson, E.A.; Taylor A.R.; Ste-Marie, C. 2014. Suivi des effets des changements climatiques : indicateurs potentiels pour les forêts et le secteur forestier du Canada. Ressources naturelles Canada, Service canadien des forêts, Ottawa (ON). 91 p.

TABLE DES MATIÈRES

- 7 RÉSUMÉ
- 11 INTRODUCTION
- 14 MÉTHODOLOGIE
- 18 INDICATEURS DES EFFETS DES CHANGEMENTS CLIMATIQUES
SUR LES FORÊTS ET LE SECTEUR FORESTIER
- 19 SYSTÈME CLIMATIQUE
- 20 Facteurs climatiques
- 25 SYSTÈME FORESTIER
- 26 Géomorphologie et hydrologie
- 30 Perturbations naturelles
- 35 Phénologie des espèces
- 41 Répartition et abondance des espèces
- 47 Dynamique des peuplements forestiers
- 52 Conditions et processus édaphiques
- 55 SYSTÈME HUMAIN
- 56 Dimensions humaines liées aux forêts
- 66 PERSPECTIVE : OCCASIONS ET DÉFIS
- 69 RÉFÉRENCES
- 79 ANNEXE 1. INDICATEURS DES EFFETS DES CHANGEMENTS CLIMATIQUES
UTILISÉS DANS LE MONDE
- 88 ANNEXE 2. COLLABORATEURS ET RÉVISEURS
- 89 ANNEXE 3. PARTICIPANTS À L'ATELIER
- 91 ANNEXE 4. ABRÉVIATIONS ET ACRONYMES



RÉSUMÉ

Introduction

Les effets des changements climatiques se font déjà sentir dans les forêts du Canada et ils ont une incidence sur l'offre de produits et de services dont dépend le secteur forestier canadien. Compte tenu de l'ampleur des changements climatiques prévus, il est de plus en plus important d'évaluer et de mettre en œuvre des mesures d'adaptation, en plus des stratégies d'atténuation. L'adaptation proactive repose sur trois éléments-clés : la connaissance des changements potentiels, la volonté d'intervenir ainsi que l'élaboration et la mise en œuvre de mesures d'adaptation (figure 1). Dans le contexte des changements climatiques, l'adaptation proactive des forêts et du secteur forestier requiert que chacun de ces trois éléments-clés s'appuie sur un cycle de gestion adaptative axé sur la surveillance, l'évaluation et l'ajustement. Le développement d'un système permettant de suivre des indicateurs qui sont pertinents pour les changements climatiques fait partie intégrante d'un tel cycle.

Le but principal du présent rapport est de proposer des indicateurs potentiels et des critères de sélection en vue de l'élaboration d'un système de suivi pour les forêts et le secteur forestier du Canada. Plus précisément, les objectifs sont : 1) de présenter une série d'indicateurs potentiels portant sur les effets des changements climatiques sur les forêts et le secteur forestier du Canada et 2) d'établir des critères pour la sélection des indicateurs et leur classement par ordre de priorité afin de permettre le suivi des effets des changements climatiques. Le présent rapport n'aborde pas les indicateurs qui évaluent l'efficacité des mesures d'adaptation, car ces indicateurs commencent seulement à être étudiés. Il est destiné aux intervenants du secteur forestier en général, notamment les décideurs de l'industrie, ainsi qu'aux représentants des ministères et institutions des gouvernements fédéral, provinciaux et territoriaux, des institutions de conservation, des organisations non gouvernementales, aux chercheurs et au public en général.

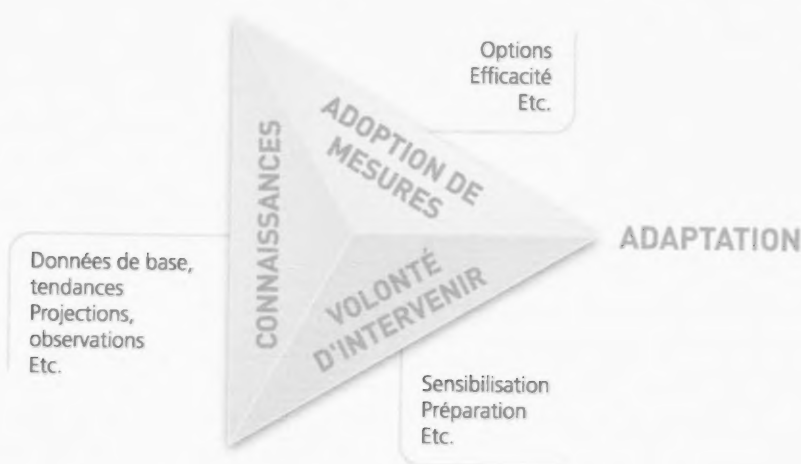


Figure 1. Le triangle de l'adaptation comprend trois éléments fondamentaux qui sont en interaction constante : les **connaissances**, la **volonté d'intervenir** et l'**adoption de mesures**. L'adaptation proactive aux effets des changements climatiques sur les forêts et le secteur forestier requiert que chacun de ces trois éléments-clés s'appuie sur un cycle de gestion adaptative axé sur la surveillance, l'évaluation et l'ajustement.

Méthodologie

Nous proposons une démarche en trois étapes pour le développement d'un système de suivi : des indicateurs proposés sont d'abord identifiés, puis soumis à un triage au moyen d'un ensemble de critères de sélection. Les indicateurs retenus sont ensuite intégrés à un système de suivi (figure 2). Avec le temps, il est possible qu'on doive revoir certains indicateurs ou en définir de nouveaux. Grâce aux progrès de la technologie, il est également possible qu'on puisse, à l'avenir, mettre en place des indicateurs dont le suivi est actuellement difficile.

Deux initiatives complémentaires ont été entreprises pour la détermination des indicateurs proposés. Tout d'abord, une vaste consultation a été menée auprès des chercheurs du Service canadien des forêts (SCF) et de représentants du secteur forestier extérieurs au SCF (plus de 100 participants). Ensuite, une revue de la littérature scientifique et de sites Internet a été faite, visant à déterminer les indicateurs en voie d'élaboration ou actuellement utilisés ailleurs dans le monde pour le suivi des effets des changements climatiques sur les forêts et le secteur forestier (plus de 500 documents et sites Web ont été consultés).

Les indicateurs proposés ont été attribués à l'un des trois systèmes suivants : climatique, forestier ou humain. On les a ensuite classés en plusieurs catégories et éléments (figure 2). Les indicateurs attribués au système climatique portent uniquement sur des facteurs climatiques ayant une incidence directe sur la structure et le fonctionnement des écosystèmes forestiers, de même que sur le système humain. Les facteurs climatiques ont été classés comme suit : la température, les précipitations, les phénomènes météorologiques extrêmes et les indicateurs d'intégration. Les indicateurs du système forestier portent sur les attributs structuraux et les processus fonctionnels susceptibles d'être affectés par les changements climatiques : la géomorphologie et l'hydrologie, les perturbations naturelles, la phénologie des espèces, la répartition et l'abondance des espèces, la dynamique des peuplements forestiers ainsi que les conditions et les processus édaphiques. Les indicateurs attribués au système humain, qui sont liés aux aspects de la forêt, comprennent des indicateurs potentiels sur les effets des changements climatiques et sur la capacité d'adaptation. Ils ont été subdivisés en huit éléments : le capital naturel, l'utilisation des forêts, les infrastructures, l'économie, le capital social, la démographie, la santé humaine ainsi que les institutions et la gouvernance.

Cinq critères ont été proposés pour la sélection des indicateurs proposés : 1) la sensibilité au climat, 2) le caractère mesurable, 3) la faisabilité, 4) la portée spatiotemporelle et 5) la pertinence. Une évaluation préliminaire des indicateurs a été entreprise à l'aide de certains de ces critères.

Indicateurs des effets des changements climatiques sur les forêts et le secteur forestier

Pour chacun des trois systèmes, nous avons établi les bases des principaux changements prévus en raison des changements climatiques. Nous avons ensuite dressé une liste d'indicateurs potentiels et établi des liens entre eux. L'analyse préliminaire des indicateurs a été entreprise uniquement pour le système climatique et le système forestier, et s'est limitée à leur sensibilité et à leur niveau de faisabilité, selon l'avis d'experts, et une revue de la littérature scientifique. Pour ce qui est du système humain, des indicateurs ont été en partie élaborés, mais ceux qui sont liés à la volonté d'intervenir et à l'adoption de mesures ainsi que les critères de sélection connexes doivent faire l'objet d'une analyse plus poussée.

Perspectives : possibilités et défis

Pour réduire l'écart entre les conditions observées et les conditions souhaitées, il est nécessaire d'établir un cadre adaptatif qui permet d'évaluer en continu l'efficacité des mesures d'adaptation au moyen d'une boucle de rétroaction axée sur la surveillance, l'évaluation et l'ajustement. Comme cette boucle de rétroaction requiert des ajustements rapides lorsque des changements et des imprévus surviennent, le suivi doit faire partie intégrante de l'adaptation. Ce processus adaptatif et itératif de prise de décisions permettra sans doute d'améliorer la gestion des forêts en réponse non seulement aux impacts des changements climatiques, mais aussi aux effets d'autres types de fluctuations.

Le travail effectué dans le cadre du présent rapport pour identifier des indicateurs potentiels des effets des changements climatiques fournit un point de départ pour le classement par ordre de priorité des indicateurs proposés pour un futur suivi, et montre que le classement et le suivi des indicateurs en sont encore à l'état embryonnaire à l'échelle de la planète. Une évaluation préliminaire de la sensibilité au climat et de la faisabilité de la mise en œuvre a été réalisée pour le système climatique et le système forestier. Dans le cas du système humain, qui réagira sans doute de façon moins déterministe aux changements climatiques que les systèmes écologiques, les efforts déployés afin de définir et d'effectuer un suivi des indicateurs auront une importance cruciale en matière d'adaptation. Une fois l'ordre de priorité des indicateurs établi, la collecte de données doit être entreprise de manière efficace et avantageuse. La mise en œuvre d'indicateurs exige l'élaboration de normes pour la collecte systématique et l'entreposage des données, afin que divers intervenants puissent les consulter, les extraire et analyser les tendances. La vulgarisation et la transmission des connaissances sont également nécessaires pour pouvoir communiquer l'information technique à une grande variété d'utilisateurs de manière intéressante et compréhensible. La collaboration et la coordination des intervenants sont

INDICATEURS PROPOSÉS

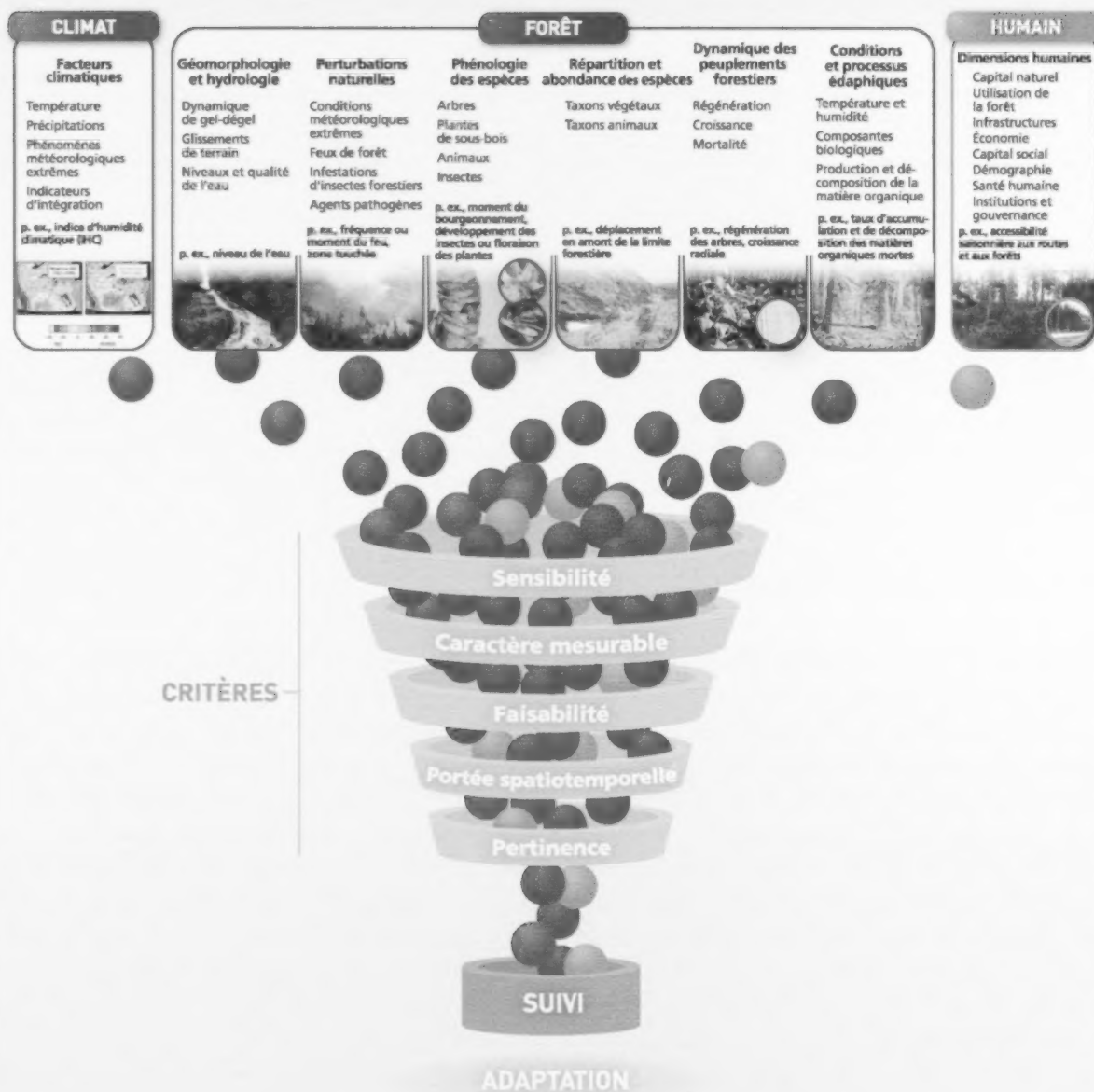


Figure 2. Cadre adopté pour la détermination et le classement par ordre de priorité des indicateurs des changements climatiques. Les indicateurs proposés sont attribués à l'un des trois systèmes suivants : le système climatique, le système forestier ou le système humain. Les indicateurs sont ensuite soumis à un triage au moyen de cinq critères, et les indicateurs retenus sont intégrés à un système de suivi. À mesure que les changements seront suivis, il est possible qu'on doive revoir certains indicateurs ou en définir de nouveaux. Un tel système de suivi fait partie intégrante du cycle d'adaptation.

cruciales pour la mise en œuvre de tous ces éléments. De façon globale, un système de suivi peut contribuer à l'adaptation en facilitant la compréhension des effets des changements climatiques et en augmentant le niveau de sensibilisation et de préparation, ce qui favorise l'élaboration d'options en matière d'adaptation. Les options peuvent ensuite être évaluées selon différents scénarios et être mises en œuvre. La surveillance de l'efficacité des mesures d'adaptation mises en place est également nécessaire à l'amélioration continue du processus.

La mise sur pied d'un vaste programme de surveillance et de collecte de données (y compris la capacité de faire rapport)

sur les changements climatiques peut sembler coûteuse à court terme, mais il faut aussi prendre en considération le coût de l'inaction. Les changements climatiques sont une réalité à court et à long terme : leurs effets seront sans doute cumulatifs et considérables. Ce rapport constitue un premier pas vers l'établissement d'une série d'indicateurs des effets des changements climatiques sur les forêts et le secteur forestier du Canada, et vers la définition d'éléments qui permettront de promouvoir des mesures d'adaptation dans le contexte des changements climatiques.

INTRODUCTION

Les changements climatiques sans précédent survenus au cours des dernières années ont entraîné une augmentation des températures moyennes de l'air de 1,6 °C au Canada entre 1948 et 2010. Les changements touchant les températures et les précipitations varient d'une région à l'autre, tant en termes de direction que d'ampleur (Environnement Canada, 2011; Mekis et Vincent, 2011). Or, les changements climatiques prévus pour le siècle à venir sont plus importants que les changements survenus au cours des 100 dernières années (GIEC, 2007; Price et coll., 2011). Les effets des changements climatiques se font déjà sentir dans les forêts du Canada. Par exemple, les processus écologiques et les régimes de perturbations naturelles ont déjà subi des modifications (Caccianiga et Payette, 2006; Hogg et coll., 2008; van Mantgem et coll., 2009) qui ont une incidence sur l'offre de produits et de services dont dépend le secteur forestier canadien.

Compte tenu de l'ampleur des changements prévus (GIEC, 2007), il est de plus en plus important d'évaluer et de mettre en œuvre des mesures d'adaptation, en plus des stratégies d'atténuation (Klein et coll., 2005; Swart et Raes, 2007).

L'adaptation proactive repose sur trois éléments-clés : la connaissance des changements qui se produisent, la volonté d'intervenir et l'adoption des mesures (figure 1). Pour ce qui est de la connaissance des changements, on a recours à la surveillance des réponses des écosystèmes, à la modélisation et à la synthèse des travaux de recherche pour évaluer les tendances passées et prévoir les effets futurs. La volonté d'intervenir repose sur la sensibilisation aux changements climatiques, les risques perçus et la disposition à agir des parties intéressées. Enfin, l'élaboration et l'évaluation d'options d'adaptation aux changements prévus permettent de sélectionner et de mettre en œuvre des mesures d'adaptation. Ces trois composantes de l'adaptation sont en interaction constante. La connaissance des changements climatiques stimule la volonté d'intervenir (sensibilisation et préparation) et aide les décideurs quant aux mesures à prendre et où les mettre en place. Cette connaissance contribue également à l'intégration des questions d'adaptation au processus habituel de prise de décision. L'évaluation des expériences passées en matière d'adaptation permet de s'ajuster en prenant les mesures correctives appropriées. Par ailleurs, l'adoption de mesures et la volonté d'intervenir favorisent

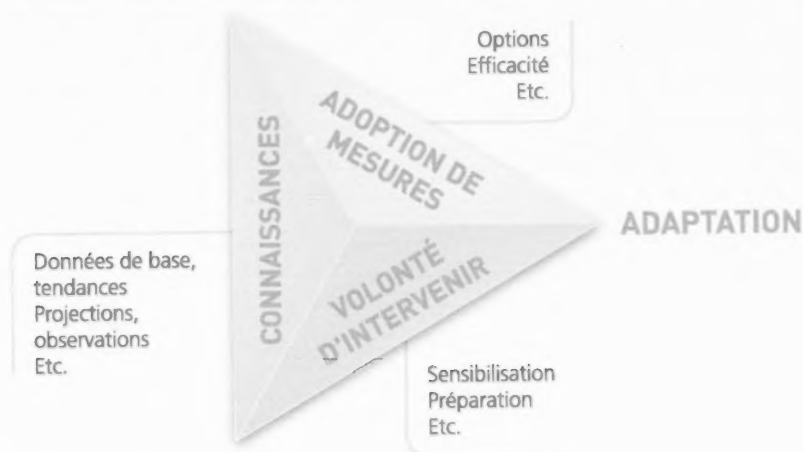


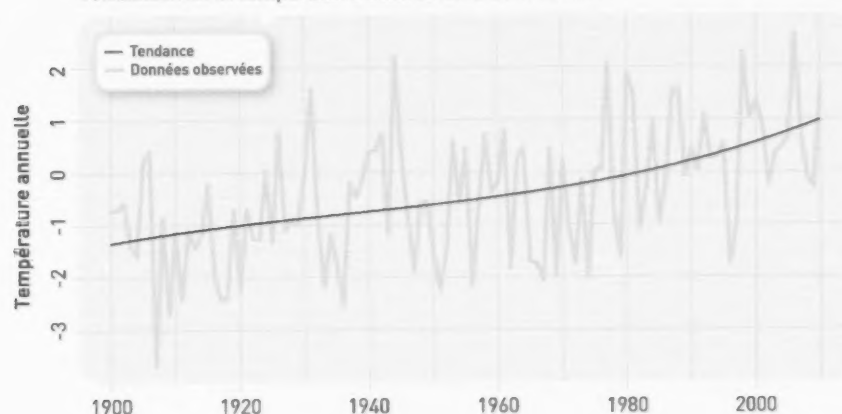
Figure 1. Le triangle de l'adaptation comprend trois éléments fondamentaux qui sont en interaction constante : les **connaissances**, la **volonté d'intervenir** et l'**adoption de mesures**. Les connaissances progressent grâce à la surveillance des réponses des écosystèmes, aux activités de modélisation et à la recherche scientifique. La volonté d'intervenir repose sur la sensibilisation aux effets des changements climatiques, les risques perçus et le degré de préparation des parties intéressées. Les mesures d'adaptation découlent de certaines options de mise en œuvre efficaces. La connaissance des effets potentiels des changements climatiques stimule la volonté d'intervenir et oriente les mesures à prendre. Cette connaissance est intégrée à la prise de décision en matière d'adaptation et permet d'améliorer l'efficacité des efforts futurs en tirant des leçons des expériences passées. L'adoption de mesures et la volonté d'intervenir favorisent l'acquisition de nouvelles connaissances, à mesure que des lacunes apparaissent. L'adoption de mesures pour atténuer les effets des changements climatiques peut avoir des répercussions positives sur la volonté d'intervenir d'autres parties intéressées. L'adaptation proactive aux effets des changements climatiques sur les forêts et le secteur forestier requiert que chacun de ces trois éléments-clés s'appuie sur un cycle de gestion adaptative axé sur la surveillance, l'évaluation et l'ajustement. L'établissement d'un système de suivi portant sur des indicateurs pertinents des effets des changements climatiques sur les forêts et le secteur forestier constitue la première étape de ce cycle.

l'acquisition de nouvelles connaissances, à mesure que des lacunes apparaissent. À son tour, l'adoption de mesures pour atténuer les effets des changements climatiques peut avoir des répercussions positives sur la volonté d'intervenir d'autres parties intéressées.

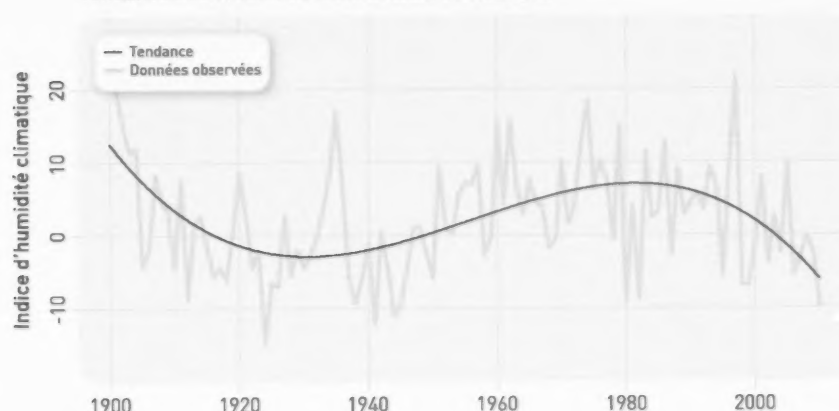
Dans le contexte des changements climatiques, l'adaptation proactive des forêts et du secteur forestier requiert que chacun de ces trois éléments-clés s'appuie sur un cycle de gestion adaptative axé sur la surveillance, l'évaluation et l'ajustement. L'établissement d'un système de suivi et de collecte de données (y compris la capacité de faire rapport) basé sur une série d'indicateurs pertinents sur les effets des changements climatiques sur les forêts et le secteur forestier (encadré 1) fait partie intégrante d'un tel cycle. Lorsqu'ils sont évalués périodiquement, les indicateurs permettent de déterminer la direction et

l'ampleur des changements et aident à détecter les variations qualitatives et quantitatives touchant les produits et les services fournis par la forêt. Bien que des progrès importants aient été réalisés concernant la prévision des changements climatiques futurs et des effets de ces changements sur les écosystèmes forestiers (p. ex., *Program for Eliminate Model Diagnosis and Intercomparison*) (Price et coll., 2011), des incertitudes demeurent, principalement en raison de la complexité sous-jacente de ces écosystèmes (Lawler et coll., 2010), d'où la nécessité de surveiller les changements et de mieux les comprendre. Dans cette optique, les indicateurs peuvent fournir des preuves qu'il existe des différences entre les changements prévus et les changements observés. Ils peuvent aussi faciliter le suivi du degré de sensibilisation et de préparation du système humain. Ces deux éléments rendent compte de la perception des risques associés aux effets des changements climatiques

Tendances de la température dans le nord de l'Alberta



Tendances de l'humidité dans le nord de l'Alberta



Depuis 1900, la température est en hausse dans le nord de l'Alberta. Pour cette même région, l'indice composite d'humidité du climat indique des conditions de sécheresse de 1920 à 1940, mais les données de cette époque étaient moins fiables que celles d'aujourd'hui, notamment en ce qui a trait aux précipitations. On a observé dans les dernières années des conditions de sécheresse similaires à celles répertoriées de 1920 à 1940. Ce phénomène est-il un signe précoce des changements climatiques? Pour répondre à la question, il faut faire le suivi de cet indicateur (fondé sur les interpolations climatiques de Michael Michaelian de Ressources naturelles Canada, au moyen du système BioSIM)

et peuvent nous aider à mieux comprendre l'incidence positive ou négative que peut avoir la perception des risques sur la capacité globale du système à s'adapter aux changements climatiques. Enfin, les indicateurs peuvent servir à évaluer l'efficacité des mesures prises et à en rendre compte, de façon à orienter les efforts futurs et les mesures à adopter par d'autres parties. En permettant l'évaluation des vulnérabilités et la mise en œuvre de mesures d'adaptation efficaces, les indicateurs fournissent un cadre pertinent pour la détermination des lacunes en matière d'information et de connaissances, ce qui peut mener à de nouvelles options et à de nouvelles orientations en vue de la réalisation d'activités de surveillance et de travaux de recherche supplémentaires sur les relations de cause à effet. Cette démarche itérative permet aussi d'optimiser la pertinence et l'efficacité des systèmes de surveillance au fil du temps, à mesure que les besoins en matière d'information et la disponibilité des données évoluent.

Le but principal du présent rapport est de fournir des indicateurs potentiels et des critères de sélection en vue de l'élaboration d'un système de suivi pour les forêts et le secteur forestier

du Canada. Spécifiquement, les objectifs sont : 1) de présenter une série d'indicateurs potentiels (y compris les indicateurs présentant un intérêt, mais, devant être approfondis) sur les effets des changements climatiques sur les forêts et le secteur forestier du Canada et 2) d'établir des critères pour la sélection des indicateurs et leur classement par ordre de priorité afin de permettre le suivi des effets des changements climatiques. Le présent rapport n'aborde pas les indicateurs qui évaluent l'efficacité des mesures d'adaptation, car ces indicateurs commencent seulement à être étudiés. La question des changements climatiques est beaucoup trop vaste pour être gérée par une seule institution ou un seul groupe d'intervenants. Les activités de surveillance nécessaires exigeront des niveaux de participation et de collaboration sans précédent parmi les acteurs du secteur forestier. Ce rapport est donc destiné aux intervenants du secteur forestier en général, notamment les décideurs de l'industrie, ainsi qu'aux représentants des ministères et institutions des gouvernements fédéral, provinciaux et territoriaux, des institutions de conservation, des organisations non gouvernementales (ONG), aux chercheurs et au public en général.

Encadré 1. Qu'est-ce qu'un indicateur?

Un indicateur est un attribut quantitatif ou qualitatif pouvant indiquer, lorsqu'il est mesuré périodiquement, si des changements se produisent (FAO, 2011). Au niveau le plus fondamental, il arrive souvent que les effets qui présentent le plus grand intérêt (p. ex., les effets sur les communautés naturelles ou la santé humaine) ne puissent pas être mesurés de manière directe ou en temps opportun. Les indicateurs fournissent alors un ensemble de mesures concrètes qui sont corrélées à ces attributs, ou qui peuvent signaler les changements les touchant. Les indicateurs doivent s'appuyer sur une compréhension commune de systèmes complexes et sur d'importantes ressources affectées à la collecte et à la communication continues des données.

Selon Gudmundsson (2003), les indicateurs utilisés dans les domaines de l'environnement et de l'évaluation de la performance ont en commun les caractéristiques suivantes :

- ils condensent de grandes quantités d'information;
- ils sont sensibles aux signaux de changement de l'élément ou du système auquel ils se rapportent;
- ils décrivent des états, des flux ou des changements au sein des systèmes;
- ils peuvent être descriptifs ou normatifs (évaluation de la performance par rapport à des normes ou à des objectifs);
- ils peuvent déterminer la causalité (relation de cause à effet).

L'établissement et la communication d'indicateurs environnementaux (au sens le plus large) sont courants de nos jours. Par exemple,

nous recevons chaque jour des bulletins sur les prévisions météorologiques et les marchés boursiers. Nous prenons connaissance des bulletins météorologiques quotidiens (sur la température de l'air et les quantités de précipitations) pour suivre la progression des saisons, choisir nos vêtements et planifier nos activités extérieures. La moyenne du Dow-Jones et l'indice composite NASDAQ ainsi que leurs tendances récentes guident les investisseurs dans leurs décisions d'acheter ou de vendre des titres en bourse. De plus, ces bulletins, tendances et prévisions varient selon les villes, les régions (dans le cas des conditions météorologiques) et les marchés et les pays (dans le cas du cours des actions). Statistique Canada publie les résultats de différents recensements et de différentes enquêtes pour faire connaître les tendances temporelles et les variations géographiques en matière d'emploi, d'activité économique, de démographie et d'éducation dans le but d'orienter les politiques et les investissements dans les secteurs publics et privés. Les indicateurs actuellement utilisés ou en cours d'élaboration dans le secteur forestier portent notamment sur l'aménagement forestier durable (http://www.ccfm.org/francais/coreproducts-criteria_in.asp) et l'intégrité écologique de même que sur les changements climatiques. L'aménagement des forêts doit être durable dans le contexte des changements climatiques. Le maintien du niveau d'intégrité écologique souhaité pose des défis en raison des pressions croissantes exercées par l'utilisation des ressources et l'évolution du climat.

MÉTHODOLOGIE

Pour développer un système de suivi, nous proposons une démarche en trois étapes : des indicateurs proposés sont d'abord déterminés, puis soumis à un triage au moyen d'un ensemble de critères de sélection, et les indicateurs retenus

sont intégrés à un système de suivi (figure 2). Avec le temps, il est possible qu'on doive revoir certains indicateurs ou en définir de nouveaux. Grâce aux progrès technologiques, il

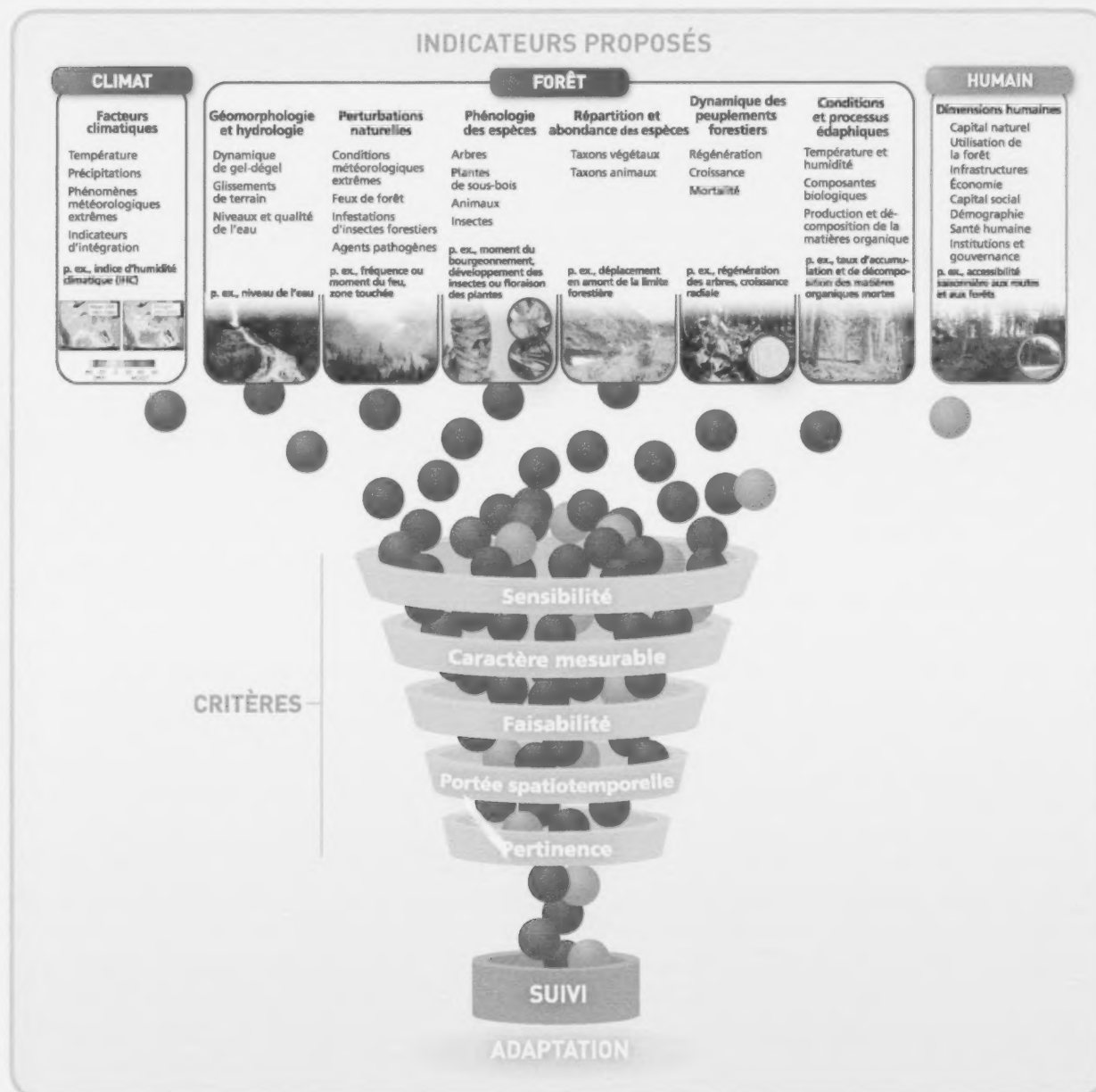


Figure 2. Cadre adopté pour la détermination et le classement par ordre de priorité des indicateurs des changements climatiques. Les indicateurs proposés sont attribués à l'un des trois systèmes suivants : climatique, forestier ou humain. Les indicateurs sont ensuite soumis à un triage au moyen de cinq critères, et les indicateurs retenus sont intégrés à un système de suivi. Tout au long du processus de suivi, il est possible qu'on doive revoir certains indicateurs ou en définir de nouveaux. Un tel système de suivi fait partie intégrante du cycle d'adaptation.

est également possible qu'on puisse mettre en place des indicateurs dont le suivi était auparavant difficile.

Deux initiatives complémentaires ont été entreprises pour la détermination des indicateurs proposés (voir l'encadré Processus de collecte de données) : une vaste consultation auprès des chercheurs du Service canadien des forêts (SCF) et d'un groupe de représentants du secteur forestier extérieurs au SCF (voir l'annexe 3, Participants à l'atelier) ainsi qu'une revue de la littérature scientifique et de sites Internet (Kremsater, 2012) visant à déterminer les indicateurs en voie d'élaboration ou actuellement utilisés ailleurs dans le monde pour le suivi des effets des changements climatiques sur les forêts et le secteur forestier.

Les indicateurs proposés ont été attribués à l'un des trois systèmes suivants : climatique, forestier ou humain (figure 2). Les indicateurs attribués au système climatique portent uniquement sur des facteurs climatiques ayant une incidence directe sur la structure et le fonctionnement des écosystèmes forestiers, de même que le système humain. Les facteurs climatiques ont été classés comme suit : la température, les précipitations, les phénomènes météorologiques extrêmes et les indicateurs d'intégration. Les indicateurs du système forestier portent sur les attributs structuraux et les processus fonctionnels susceptibles d'être affectés par les changements climatiques : la géomorphologie et l'hydrologie, les perturbations naturelles, la phénologie des espèces, la répartition et l'abondance des espèces, la dynamique des peuplements forestiers ainsi que les conditions et les processus édaphiques. Les indicateurs attribués au système humain, liés aux dimensions de la forêt, comprennent des indicateurs potentiels sur les effets des changements climatiques et sur la capacité d'adaptation. Ils ont été subdivisés en huit éléments : le capital naturel, l'utilisation des forêts, les infrastructures, l'économie, le capital social, la démographie, la santé humaine ainsi que les institutions et la gouvernance.

Cinq critères ont été établis pour la sélection des indicateurs (Landres et coll., 1988; Dale et Beyeler, 2001; Steenberg et coll., 2011; figure 2) : 1) la sensibilité au climat, 2) le caractère mesurable, 3) la faisabilité, 4) la portée spatiotemporelle et 5) la pertinence. Une évaluation préliminaire des indicateurs a été entreprise à l'aide de certains de ces critères (voir la section Indicateurs des effets des changements climatiques sur les forêts et le secteur forestier).

1) Les indicateurs doivent être sensibles au climat et présenter un rapport signal/bruit élevé (Kenney et coll., 2011). Ainsi, les indicateurs liés à la phénologie des arbres sont particulièrement sensibles au climat, notamment aux fluctuations de température au printemps et à l'automne (Cleland et coll., 2012; Fridley, 2012). Inversement, certains indicateurs, tels que ceux qui mettent en jeu des interactions complexes, sont sensibles à

de nombreux facteurs. Par exemple, les changements climatiques peuvent avoir des effets négatifs sur la santé et le bien-être des populations humaines, en raison de l'augmentation de la fréquence et de l'intensité des vagues de chaleur, des inondations, des sécheresses et des dégagements de fumée dus à des incendies de forêt. Toutefois, des problèmes de santé similaires peuvent aussi être causés par des facteurs qui ne sont pas liés au climat.

2) Les indicateurs doivent pouvoir être mesurés de façon empirique et objective. Ainsi, la température du sol est facile à évaluer à l'aide de thermomètres numériques portatifs ou installés de manière permanente, et on peut la mesurer périodiquement pour déterminer les tendances. En revanche, la biodiversité du sol est plus difficile à mesurer en raison de l'absence de techniques adéquates et uniformisées permettant d'identifier les espèces (Kirk et coll., 2004). Un gramme de sol peut contenir plus de 10 milliards de microorganismes (Roselló-Mora et Amann, 2001), dont moins de 1 % se prête à la culture et à la caractérisation (Torsvik et Øvreås, 2002).

3) Les indicateurs devraient pouvoir être évalués et utilisés de façon réaliste. Ce facteur déterminera les ressources financières et humaines requises pour leurs mises en œuvre. Ainsi, un indicateur pour lequel on possède déjà des données de base peut être plus facile à mettre en œuvre qu'un indicateur pour lequel il faut recueillir de nouvelles données. Dans la mesure du possible, les données de base doivent couvrir une période d'au moins 30 ans (ce qui correspond à la norme habituelle pour l'établissement des normales climatiques). Ces données de base sont facilement accessibles pour certains indicateurs (voir la section Facteurs climatiques), mais dans d'autres cas, par exemple, en ce qui concerne les caractéristiques du régime des feux de forêt, il peut être nécessaire d'obtenir des données de base sur une plus longue période. Pour certains indicateurs, il est possible que des données pertinentes aient déjà été recueillies, à d'autres fins ou par des institutions différentes (p. ex., les dates de plantation des arbres ou les périodes durant lesquelles l'accès à la forêt est restreint à cause des risques de feux). Les données sont rarement uniformisées d'une juridiction à l'autre, ce qui peut limiter leur utilité ou leur applicabilité.

Les critères liés à la sensibilité, au caractère mesurable et à la faisabilité reposent sur les connaissances scientifiques et les normes méthodologiques actuelles. Un indicateur pourrait être mis de côté parce qu'il n'est pas suffisamment sensible aux signaux climatiques ou parce que le signal ne peut pas être distingué des autres facteurs desquels il dépend. Un indicateur pourrait aussi être mis de côté en raison de données non disponibles en ce moment ou de l'impossibilité de recueillir l'information nécessaire de manière efficace. Cependant, compte tenu de l'évolution rapide de la science et de la technologie (p. ex., la surveillance par des techniques de

télédétection, l'utilisation de téléphones intelligents, etc.), nous recommandons de ne pas éliminer d'indicateurs uniquement sur la base de ces critères. De plus, à mesure que notre compréhension des changements climatiques et des systèmes socioécologiques progressera, les indicateurs pourront évoluer en fonction de la croissance et de l'évolution des besoins, de la capacité et du savoir.

Une fois que les indicateurs ont été classés en fonction de ces trois critères, il faut prendre en compte les considérations ayant trait aux objectifs du système de suivi (figure 2). Ces considérations sont en grande partie liées au critère 4, la portée spatiotemporelle, et au critère 5, la pertinence.

4) La portée spatiotemporelle revêt une importance particulière dans le contexte des forêts canadiennes. Compte tenu de la vaste superficie du territoire forestier du Canada, il est peu probable que les effets des changements climatiques soient uniformes. Par conséquent, un système national de suivi des indicateurs des changements climatiques doit tenir compte des variations régionales. Les observations doivent être effectuées à de nombreux endroits et dans différentes régions forestières, de préférence sur de longues périodes. Certains indicateurs spécifiques à une région et qui ne sont pas évalués partout au Canada devraient possiblement être ajoutés au système de surveillance national si les résultats ont une incidence à l'échelle du pays. Un bon exemple récent nous est fourni par l'épidémie de dendroctones du pin ponderosa (*Dendroctonus ponderosae*), que l'on trouve uniquement dans les forêts de l'Ouest, mais dont les répercussions économiques se font sentir dans l'ensemble du pays. Notons toutefois que lorsque l'on transpose des mesures à l'échelle nationale, il peut arriver que des données locales pertinentes soient perdues. Beckley (2009) propose alors d'adopter une approche multidimensionnelle reposant sur trois groupes d'indicateurs : un groupe d'indicateurs qui sont identiques à toutes les échelles spatiales, un deuxième groupe d'indicateurs liés à des thèmes similaires et un troisième groupe d'indicateurs locaux reflétant le caractère particulier d'un endroit donné ou d'un cadre précis de gestion des forêts. Une telle approche peut contribuer à équilibrer la représentativité des indicateurs par rapport à différents environnements, types de gouvernance et paliers institutionnels.

5) La notion de pertinence d'un indicateur réfère à la manière dont celui-ci supporte les objectifs d'un système de suivi en particulier (p. ex., la communication d'informations aux citoyens ou aux décideurs). Certains indicateurs peuvent s'avérer très pertinents pour la détection des changements qui se produisent dans les forêts, alors que d'autres peuvent contribuer à faire connaître les risques associés aux effets des

changements climatiques et stimuler la volonté d'agir de la société. Certains indicateurs peuvent contribuer à plus d'un élément de suivi à la fois. Par exemple, la mesure des indices forêt météo qui débute trois jours après la disparition de la neige peut fournir une estimation non seulement des risques de feu de forêt, mais aussi de la période durant laquelle la couverture de neige est présente (ou absente) dans la forêt.

Les critères définis ci-dessus s'appliquent bien aux indicateurs liés au système climatique et au système forestier. Cependant, l'état des connaissances à propos des liens qui existent entre la société et l'environnement forestier ainsi que la capacité de mesurer ces liens n'a pas encore permis de dégager un consensus quant aux indicateurs pertinents pouvant convenir pour le système humain. Des efforts considérables ont été déployés pour mieux comprendre les relations existant entre les gens et les forêts selon différents points de vue (culturel, économique, éthique, institutionnel, politique, psychologique, sociologique, spatial, etc.) (Harshaw et coll., 2007; Stedman et coll., 2007; Rayner, 2012). Des indicateurs portant sur les impacts sociaux et économiques ont été en partie établis, mais les indicateurs liés à la volonté d'adaptation et à l'adoption de mesures d'adaptation devront faire l'objet d'une analyse plus poussée. En fait, il reste fort à faire pour s'entendre sur des indicateurs pouvant être utilisés pour évaluer ces concepts. Plusieurs concepts-clés ont été proposés pour décrire les caractéristiques du système socioécologique (p. ex., capacité communautaire, dépendance envers la forêt et valeurs forestières) (Doak et Kusel, 1996; MacKendrick et Parkins, 2005; Stedman et coll., 2007; Moyer et coll., 2008; Flint et coll., 2009), et des recommandations ont été formulées pour améliorer les indicateurs sociaux liés à la forêt en général ou aux effets des changements climatiques. Beckley et coll. (2002) proposent de se concentrer sur la contribution des forêts au bien-être des collectivités et d'éviter les indicateurs qui sont exclusivement associés à la forêt. Les spécialistes réunis pour aider l'équipe de la U.S. National Climate Assessment à élaborer des indicateurs sociaux ont également insisté sur la nécessité de trouver un équilibre entre les effets des changements climatiques et ce qui importe pour les gens, notamment les répercussions sur leurs familles, leurs collectivités, leurs institutions et leur société en général (Kenney et coll., 2011). Les indicateurs devraient permettre de décrire non seulement la situation actuelle, mais aussi la situation passée et les changements à venir (Kusel, 2001). Comme l'importance relative des différents éléments et des différentes fonctions des systèmes sociaux par rapport à l'environnement forestier suscite encore de nombreux débats, les critères de sélection des indicateurs dans ce domaine devront faire l'objet d'une analyse plus approfondie.

PROCESSUS DE COLLECTE DE DONNÉES

L'équipe de base* de l'Initiative sur les indicateurs des changements climatiques du SCF comprenait au moins un membre de chaque centre du SCF. L'équipe a tenu une série d'ateliers, puis elle a rassemblé et interprété les informations recueillies à chaque atelier et supervisé et synthétisé la revue de la littérature scientifique et des sites Internet sur les indicateurs utilisés et a contribué à la rédaction du présent rapport.

Établissement d'une liste d'indicateurs potentiels en collaboration avec des chercheurs et des intervenants

Au cours de la première phase de l'initiative, un atelier a été organisé dans chacun des centres régionaux du SCF, entre novembre 2011 et janvier 2012. Les participants aux ateliers étaient des spécialistes du SCF travaillant dans des disciplines variées, mais plus particulièrement en sciences biophysiques. L'atelier a été structuré de manière à amener les participants à proposer et à constituer un ensemble logique et cohérent d'indicateurs des effets des changements climatiques sur les forêts et le secteur forestier du Canada. Une grille remplie à titre d'exemple et une grille à remplir ont été envoyées aux participants avant l'atelier. La grille remplie contenait des renseignements généraux et permettait aux participants d'amorcer le processus de réflexion sur l'identification d'indicateurs pertinents. Les participants devaient remplir au moins une grille avant l'atelier. Les membres de l'équipe de base ont expliqué le contexte et fourni des renseignements généraux au début de chaque atelier. Les participants ont ensuite été invités à proposer des indicateurs, et Sylvie Gauthier et Miren Lorente ont présenté les résultats obtenus dans le cadre des ateliers tenus dans les autres centres du SCF. La suite de l'atelier a été consacrée à des discussions sur d'autres indicateurs potentiels et sur les indicateurs déjà présentés. La durée moyenne des ateliers a été de trois heures.

La deuxième phase des consultations a eu lieu le 29 février 2012, à Ottawa. Le SCF a réuni des représentants du secteur forestier, du milieu universitaire et des gouvernements provinciaux ainsi que des chercheurs dans le domaine des changements climatiques afin d'acquiescer des connaissances sur la façon de mieux intégrer la question du changement climatique à l'aménagement forestier. Sylvie Gauthier a présenté une synthèse des résultats des ateliers régionaux du SCF, et les participants ont discuté du type d'indicateurs requis et de la contribution possible du secteur forestier au suivi de ces indicateurs. Les discussions ont porté sur cinq grands thèmes : les indicateurs climatiques du milieu forestier, les indicateurs de l'écosystème forestier, les indicateurs de l'économie forestière, les indicateurs des collectivités forestières et la capacité d'adaptation du secteur forestier. Peu d'indicateurs socioéconomiques avaient été proposés lors des ateliers régionaux du SCF, mais la deuxième phase des consultations a été particulièrement utile pour déterminer les indicateurs potentiels dans ce domaine.

* Sylvie Gauthier, Miren Lorente, Laurie Kremsater, Louis De Grandpré, Philip J. Burton, Isabelle Aubin, Edward H. Hogg, Solange Nadeau, Elizabeth A. Nelson, Anthony R. Taylor et Catherine Ste-Marie

Revue de la littérature scientifique et des sites Internet sur les initiatives en cours portant sur des indicateurs des effets des changements climatiques

Pour mieux connaître les indicateurs qui sont actuellement utilisés pour évaluer les changements climatiques, Laurie Kremsater a réalisé un examen approfondi de la littérature scientifique et de sites Internet de janvier à mars 2012, en se concentrant sur les territoires de l'hémisphère nord où l'on trouve des forêts boréales ou tempérées. Elle a effectué ses recherches à l'aide des moteurs de recherche Google, Google Scholar et Web of Science en utilisant les mots-clés suivants : « climate change » (changements climatiques) ou « global warming » (réchauffement climatique) et « forests » (forêts) ou « forestry » (foresterie) et « indicators » (indicateurs) ou « monitoring » (surveillance) ou « assessment » (évaluation). Des milliers de résultats de recherche ont ainsi été obtenus pour chaque juridiction. L'examen s'est toutefois limité aux 200 premiers résultats et aux quelque 900 articles trouvés au départ. Les sites Web gouvernementaux de chaque province, territoire, État et pays ainsi que ceux d'institutions connues, ont aussi fait l'objet des recherches à l'aide des mots-clés « climate change » ou « global warming » et « forests », afin de trouver des publications gouvernementales pertinentes. À l'échelle mondiale, environ 500 articles et 150 sites Web ont été inventoriés. Une attention particulière a été portée aux initiatives existantes ou proposées dans les différentes provinces et les différents États ou pays en matière de surveillance et de collecte de données (y compris la capacité de faire rapport), et notamment aux critères utilisés pour classer les indicateurs et établir leur ordre de priorité. Les recherches effectuées par juridiction et par mots-clés ont permis de trouver de l'information sur des programmes gouvernementaux, mais aussi de nombreux articles portant sur des études sur les effets des changements climatiques sur les forêts. Dans la plupart des cas, il n'a pas été possible d'obtenir une vue d'ensemble de l'approche adoptée dans un territoire en matière d'indicateurs des effets des changements climatiques sans inclure les articles cités, souvent rédigés par des scientifiques au service d'institutions. La revue de la littérature scientifique comprend donc de l'information provenant de nombreux articles sur les effets des changements climatiques et les indicateurs des effets des changements climatiques sur les forêts. Plusieurs indicateurs ont été proposés par des chercheurs ou ont été utilisés à l'échelle locale ou régionale ou durant une période limitée, et n'ont pas nécessairement été mis en œuvre de façon concrète par une instance gouvernementale.





INDICATEURS DES EFFETS DES CHANGEMENTS CLIMATIQUES SUR LES FORÊTS ET LE SECTEUR FORESTIER

Pour chacun des trois systèmes, soit le système climatique, le système forestier et le système humain, nous avons établi les bases des principaux changements prévus avec les changements climatiques. Nous avons ensuite dressé une liste d'indicateurs potentiels et établi des liens entre eux. Bien que nous ayons tenu compte de plusieurs considérations lors de l'évaluation des indicateurs des effets des changements climatiques (voir la section Méthodologie), nous avons entrepris une analyse préliminaire des indicateurs uniquement pour le système climatique et le système forestier et nous nous sommes limités à leur sensibilité et à leur faisabilité, en nous basant sur l'avis d'experts et une revue de la littérature scientifique.

L'évaluation des indicateurs devra être approfondie avant qu'on puisse en établir un ensemble complet. De plus, notre connaissance du réseau de relations existant entre l'environnement forestier et les systèmes sociaux demeure limitée (Beckley et coll., 2002; McCool, 2003; Mitchell et Parkins, 2011). Très peu d'articles scientifiques ont été publiés sur les variations des indicateurs socioéconomiques en réponse aux changements climatiques (Rosenzweig et coll., 2007). Au lieu d'énumérer les indicateurs qui sont utilisés actuellement et d'évaluer la possibilité de les appliquer au système humain, nous avons plutôt déterminé les éléments pour lesquels des indicateurs pouvaient être élaborés.



SYSTÈME CLIMATIQUE



FACTEURS CLIMATIQUES

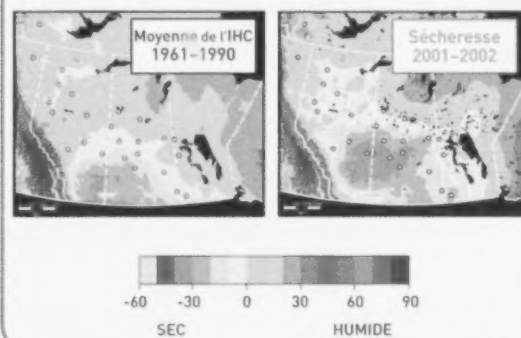
En quoi consiste la catégorie Facteurs climatiques et comment est-elle structurée?

Les facteurs climatiques sont les principaux éléments climatiques et météorologiques qui influent sur les écosystèmes forestiers et le secteur forestier. Cette catégorie regroupe la température, les précipitations, les phénomènes météorologiques extrêmes et les indicateurs dérivés qui ont des répercussions importantes sur les processus et la structure des écosystèmes forestiers. Elle comprend aussi les indices d'intégration (p. ex., les indices de sécheresse et les indices forêt-météo) qui pourraient être utiles pour la prévision des changements liés au climat dans nos forêts. Les indicateurs de cette catégorie sont regroupés selon les éléments suivants : la température, les précipitations, les phénomènes météorologiques extrêmes et les indicateurs d'intégration (tableau 1).

En quoi les facteurs climatiques sont-ils liés aux changements climatiques?

Tous les aspects des écosystèmes forestiers sont touchés par les phénomènes climatiques et météorologiques, qui subissent à leur tour l'influence des changements climatiques. Il est donc utile de surveiller les facteurs climatiques pour assurer un suivi des changements climatiques et déterminer les causes des changements touchant les processus biologiques, les communautés écologiques et l'environnement physique. Dans certains cas, ces variables primaires peuvent fournir des mesures directes pertinentes concernant les effets liés au climat qui sont observés dans les écosystèmes forestiers. Par exemple, le dégel du pergélisol, qui a une incidence sur les forêts et l'infrastructure de transport dans les régions nordiques, est directement lié à la température annuelle moyenne et au nombre de jours au-dessus du point de congélation; on peut prévoir la phénologie, la croissance et la répartition de nombreux organismes à l'aide d'indicateurs simples comme la température quotidienne (p. ex., les degrés-jours de croissance et moment où survient le gel). D'autres indices ont été spécialement conçus pour rendre compte des réactions physiologiques des arbres ou d'autres organismes, comme le dépérissement du bouleau (*Betula* spp.) à la suite d'épisodes de gel-dégel en hiver et au printemps (Bourque et coll., 2005). Les modèles d'expansion de l'aire de répartition due au climat qui sont établis pour des insectes forestiers tels que le dendroctone du pin ponderosa reposent habituellement sur une combinaison de facteurs climatiques et de réactions des espèces (Safranyik et coll., 2010), malgré les difficultés inhérentes associées à la prévision des effets des conditions climatiques sur les infestations et les expansions d'aires de répartition des insectes forestiers. Certains indicateurs d'intégration permettent de décrire des facteurs complexes comme la sécheresse qui ont une incidence directe sur le taux de croissance de la forêt et peuvent entraîner une

Indice d'humidité climatique



augmentation de la mortalité des arbres et un échec de la régénération. De plus, la sécheresse peut avoir des effets indirects sur les forêts en réduisant la capacité des arbres à se défendre contre les insectes et les maladies. De la même manière, le feu joue un rôle important dans le fonctionnement des écosystèmes forestiers du Canada, et constitue par ailleurs une menace majeure pour la sécurité du public et le secteur forestier. Parmi les facteurs climatiques, ceux qui ont une incidence sur le danger et le risque d'incendie sont particulièrement importants.

Quels seront les effets des changements climatiques sur les facteurs climatiques et comment pourrait-on les mesurer?

Température

Les changements de température auront sans doute des répercussions sur de nombreux attributs des forêts, tels que la croissance de la végétation, la vitesse de développement des insectes ou la survie hivernale. Dans la plupart des régions du Canada, on a constaté une augmentation significative de la température annuelle moyenne depuis 1950 (Zhang et coll., 2011), et le réchauffement du climat devrait se poursuivre durant le présent siècle (GIEC, 2007). Le réchauffement prévu est relativement plus important en hiver qu'en été. La fréquence des épisodes de températures maximales extrêmes devrait quelque peu augmenter, et il y aura une réduction encore plus marquée du nombre d'épisodes de températures minimales extrêmes (Kharin et coll., 2007). La température dicte la longueur de la saison de croissance, qu'on définit habituellement comme la période s'écoulant entre la dernière gelée printanière et la première gelée automnale (Schwartz et coll., 2006). Selon les données de nombreuses stations météorologiques du Canada, la saison de croissance débute plus tôt depuis quelques années (Zhang et coll., 2011). Le prolongement de la saison de croissance, combiné à la hausse des températures durant cette saison, a entraîné une augmentation significative des degrés-jours de croissance. Certaines données indiquent également une

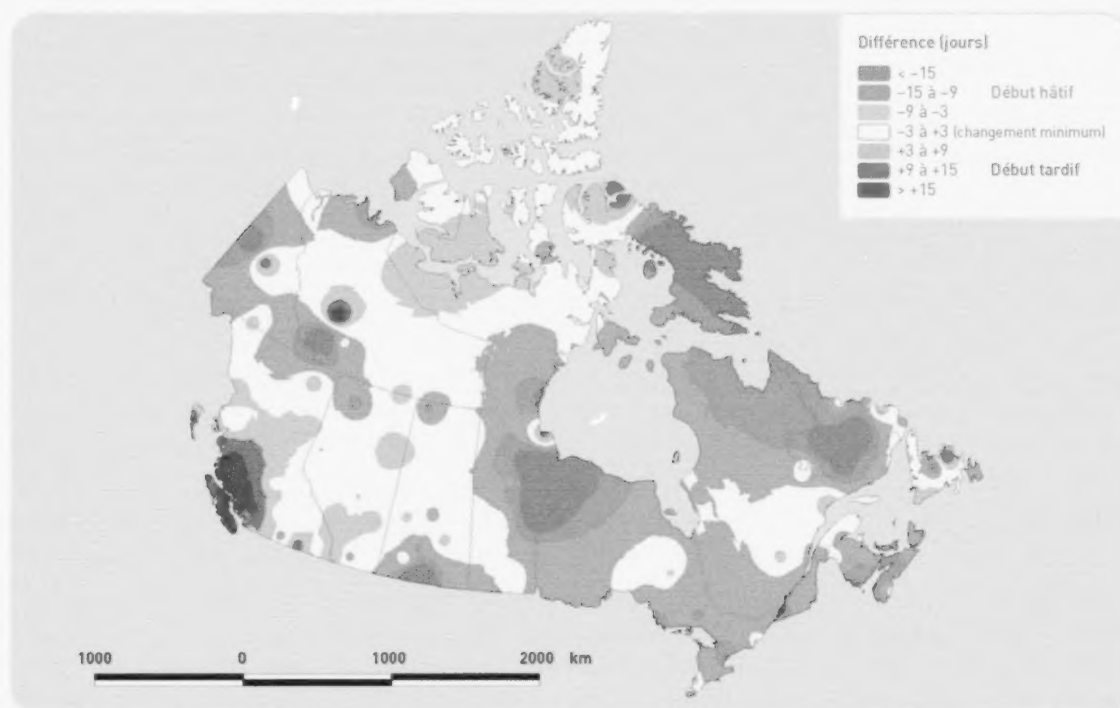
réduction de la fréquence des jours de gel et des jours de gelée causant la mort durant la saison de croissance (Zhang et coll., 2011). Le prolongement de la saison de croissance peut avoir à la fois des effets positifs et des effets négatifs sur les forêts. Les profils de température sont importants pour de nombreux autres indicateurs (p. ex., les indices de sécheresse, les modèles de populations d'insectes et le dégel du pergélisol).

Précipitations

Les changements touchant les précipitations auront presque certainement des effets significatifs sur les écosystèmes forestiers, et le suivi de ces changements sera important sur le plan de la gestion. L'incidence des précipitations sur les forêts est toutefois indirecte : les précipitations ont un effet sur l'humidité du sol, l'épaisseur de la neige et d'autres facteurs. De plus, les prévisions concernant les précipitations sont moins fiables que les prévisions de température. De façon générale, on prévoit une augmentation de la fréquence des années humides et des épisodes de précipitations extrêmes ainsi qu'une plus grande variabilité interannuelle. On s'attend également à une diminution du stock nival, une plus grande quantité de pluie et une plus faible quantité de neige étant prévues. Dans certaines régions du pays, les précipitations sous forme de pluie verglaçante qui pourraient causer de graves dommages à la végétation devraient augmenter

(Catto, 2010). Par ailleurs, une augmentation des sécheresses en été (déficit d'humidité du sol), due au réchauffement climatique, est prévue dans certaines régions. Comme il est établi que les prévisions comportent un degré d'incertitude élevé, il est important de continuer à surveiller les régimes de précipitations réels. À certains endroits, on a déjà noté une diminution des précipitations hivernales et une augmentation des précipitations estivales (p. ex., dans la plus grande partie de la Colombie-Britannique) (Rodenhuis et coll., 2009). À d'autres endroits, c'est l'inverse qui se produit. Il est à noter que même lorsque les précipitations estivales augmentent, elles peuvent être concentrées dans le temps, de sorte qu'il peut quand même y avoir des périodes de sécheresse prolongées. Toute augmentation des précipitations sera probablement plus que compensée par la demande en évaporation associée à la hausse des températures.

Le stock nival devrait diminuer en raison de l'élévation prévue de la limite des neiges permanentes en région montagneuse. Les changements prévus concernant les périodes d'accumulation et de fonte du stock nival sont incertains, mais ils pourraient avoir des effets considérables sur les processus des écosystèmes forestiers et sur les opérations forestières. De plus, ces changements sont importants pour la détermination du début et de la fin de la saison des feux de forêt. Les profils saisonniers d'accumulation et de fonte des neiges sont très sensibles aux variations de



Exemple d'un indice d'intégration (IFM), où l'on compare les dates (jours juliens) du début de la saison des feux de forêt des dix dernières années au Canada à celles des années antérieures (1970-2002) (Richard Carr, Ressources naturelles Canada, en préparation).

température et de précipitations; la fonte rapide de la neige durant des périodes de chaleur extrême au printemps peut causer des inondations à grande échelle. Le ruissellement causé par la fonte des neiges représente une part substantielle du débit d'eau total dans les bassins dominés par la fonte des neiges, et constitue donc une variable hydrologique importante pour la recharge et le maintien des conditions liées au débit de base.

Phénomènes météorologiques extrêmes

La fréquence des phénomènes météorologiques extrêmes devrait augmenter (Easterling et coll., 2000). Durant les périodes d'ajustement climatique, des conditions météorologiques inattendues ou inhabituelles pour la saison peuvent survenir, comme des gelées tardives ou précoces, des chutes de neige extrêmement abondantes, des tempêtes de verglas et de grêle, de périodes de sécheresse, des vents violents, de la foudre causant des incendies ou des périodes de chaleur et de froid extrêmes. Bon nombre de ces phénomènes peuvent avoir des répercussions importantes sur les forêts, car celles-ci réagissent plus rapidement aux phénomènes météorologiques qu'aux moyennes climatiques. L'indicateur lié à la température permet de rendre compte des épisodes de chaleur extrême et des gelées précoces et tardives. Les phénomènes météorologiques extrêmes concernent des éléments comme les vents, les orages, la foudre et les sécheresses. Les vents violents affectent les forêts directement, en déracinant des arbres, et indirectement, en favorisant l'activité des feux. Les effets des changements climatiques sur les orages et la foudre ne sont pas bien modélisés; le suivi des changements réels concernant le moment où surviennent les orages et la densité de la foudre sera important pour la gestion des feux. La sécheresse peut être considérée comme un phénomène extrême, mais nous l'avons incluse dans certains des indicateurs d'intégration mentionnés ci-dessous.

Indicateurs d'intégration

Les indicateurs d'intégration utilisés pour surveiller la sévérité et l'ampleur des sécheresses combinent les effets liés à la température et aux précipitations. Ces indicateurs sont très

pertinents pour les forêts. Des données indiquent déjà que les épisodes de dépérissement des forêts, souvent attribués à plusieurs agents de dégradation, ont récemment augmenté à l'échelle mondiale à la suite de graves sécheresses (Allen et coll., 2010). Les dommages causés par la sécheresse résultent en grande partie d'une diminution de l'humidité du sol dans la zone d'enracinement des arbres. L'humidité du sol est tributaire à la fois des apports d'eau (pluie et neige) et des pertes d'eau, c'est-à-dire l'eau absorbée par les végétaux, le ruissellement, les mouvements latéraux de l'eau dans le sol et l'infiltration au-delà de la zone d'enracinement. Bien que moins précis que les données cartographiques sur l'humidité du sol, les indices de sécheresse fondés sur des données simples (p. ex., la température et les précipitations) fournissent un moyen plus pratique d'évaluer la variation spatiotemporelle des conditions d'humidité liées aux changements touchant le fonctionnement des écosystèmes forestiers à l'échelle de vastes régions. Dans le secteur agricole, les conditions de sécheresse sont le plus souvent signalées au moyen de l'indice de sévérité de sécheresse de Palmer (ISSP), qui combine des données sur les précipitations, la température, la capacité de rétention de l'humidité du sol et l'infiltration locale. D'autres indices, tels que l'indice d'humidité du climat (IHC) et la Méthode canadienne de l'Indice forêt météo (IFM), servent d'indicateurs pour les forêts du Canada. Le rapport entre les précipitations et l'évapotranspiration potentielle est aussi signalé à l'occasion.

Les facteurs climatiques qui influent sur la sévérité et l'ampleur des incendies comprennent la température, le vent, l'humidité relative et les régimes de précipitations. La Méthode de l'IFM combine ces facteurs pour produire divers indicateurs portant sur les effets des conditions météorologiques sur le comportement du feu (p. ex., le risque d'inflammation, la vitesse de propagation du feu, la consommation de combustible et l'intensité du feu), y compris les variations de la teneur en eau des combustibles ligneux et de la matière organique inflammable recouvrant le sol. Les composantes de la Méthode de l'IFM sont très sensibles aux changements climatiques.

Tableau 1. Indicateurs des facteurs climatiques

ÉLÉMENTS	INDICATEURS ^a	SENSIBILITÉ ^b	FAISABILITÉ ^c	PRINCIPALES CONSIDÉRATIONS
Température	Températures quotidiennes moyennes, maximales et minimales et valeurs dérivées (températures moyennes mensuelles, saisonnières et annuelles).	E	E	<p>Certaines stations climatologiques produisent des données d'observation sur les températures quotidiennes et les précipitations depuis la fin des années 1800, mais la couverture spatiale est peu dense avant les années 1940 pour la plupart des régions forestières du Canada. On dispose d'observations horaires remontant aux années 1950 pour certaines stations climatologiques.</p> <p>Plusieurs systèmes informatiques (p. ex., ANUSPLIN [Australian national University Splines] et BioSIM (biosimulation)) sont couramment utilisés pour l'interpolation spatiale et la cartographie historique des variables climatiques à l'échelle du Canada (McKenney et coll., 2006; Régnière et Saint-Amant, 2008). Parmi les autres systèmes utilisés, mentionnons PRISM (Planning tool for Resource Integration Synchronisation and Management) et l'outil ClimateVNA (Climate Western North America), employés aux États-Unis et pour les régions montagneuses de l'ouest du Canada (Daly et coll., 2002; Wang et coll., 2006), ainsi que les produits employés à l'échelle mondiale, comme les ensembles de données historiques maillées sur la température du Climate Research Unit (Jones et coll., 2012). Ces produits servent également à produire des cartes des changements climatiques projetés, à partir de modèles de circulation générale.</p> <p>Depuis les années 1990, l'automatisation des mesures météorologiques et la fermeture de stations d'observation climatiques à long terme posent des difficultés croissantes sur le plan de la continuité et de la couverture spatiale de la surveillance climatique au Canada.</p> <p>Les statistiques sommaires couramment utilisées pour assurer le suivi de la température (comme les moyennes annuelles ou mensuelles et les températures minimales et maximales) ne fournissent pas nécessairement les données les plus utiles pour l'évaluation des effets sur les forêts et le secteur forestier et qui sont liées à la température.</p> <p>Les indicateurs dérivés, tels que la durée de la saison de croissance et les dates de la première gelée et de la dernière gelée, peuvent fournir des mesures plus utiles pour la surveillance des effets sur la régénération des arbres et l'établissement des peuplements, la productivité primaire et la durée de la saison des feux. Ces attributs peuvent être dérivés de données qui sont accessibles quotidiennement. Il faut faire preuve de prudence lorsqu'on applique des données qui proviennent de stations météorologiques (souvent situées dans des aéroports ou d'autres zones aménagées) aux conditions microclimatiques étudiées dans des forêts ou des zones où l'on trouve des types de végétation différents. Lorsqu'elles sont disponibles, les mesures effectuées sur place sont beaucoup plus fiables pour ce qui est des phénomènes liés à la température, comme les gelées estivales.</p> <p>Juridictions : Environnement Canada (EC) gère les Archives climatologiques nationales du Canada, dont les données sont accessibles gratuitement. D'autres réseaux climatiques, tels que les stations de météorologie forestière provinciales, assurent une plus grande couverture spatiale, mais les méthodes d'observation, de communication des données et d'accès aux données varient. Dans la plupart des territoires, on indique les températures quotidiennes ou horaires, qui peuvent aussi être compilées sous forme de données mensuelles, saisonnières ou annuelles (voir l'annexe 1) (New et coll., 1999; Lemieux et coll., 2010). Les données sur les gelées et la durée de la saison de croissance sont moins courantes.</p>
	Degrés-jours de croissance : nombre cumulatif annuel de degrés de température moyenne quotidienne au-dessus de 5 °C ou d'une autre température de référence.	E	M	
	Degrés-jours de froid : nombre cumulatif annuel de degrés de température moyenne quotidienne au-dessous de 0 °C ou d'une autre température de référence.	E	M	
	Nombre de jours où les températures sont supérieures ou inférieures à un seuil donné (peut varier selon le processus biophysique étudié).	E	M	
	Date de la dernière gelée, date de la première gelée, nombre de jours sans gelée.	E	M	
	Autres indicateurs liés à la température, tels que la durée de la saison de croissance (et les épisodes de gel-dégel).	E	M	

^a Les indicateurs en caractères ordinaires sont issus des ateliers; les indicateurs en italiques proviennent de la revue de littérature scientifique et Internet; les indicateurs en caractères gras proviennent à la fois des ateliers et de la revue de littérature scientifique et Internet.

^b Sensibilité de l'indicateur aux changements climatiques : élevée (E), moyenne (M) ou faible (F).

^c Faisabilité de la mesure dans le cadre d'un système de suivi régional ou national : élevée (E), moyenne (M) ou faible (F).

(à suivre)

Tableau 1. (suite et fin)

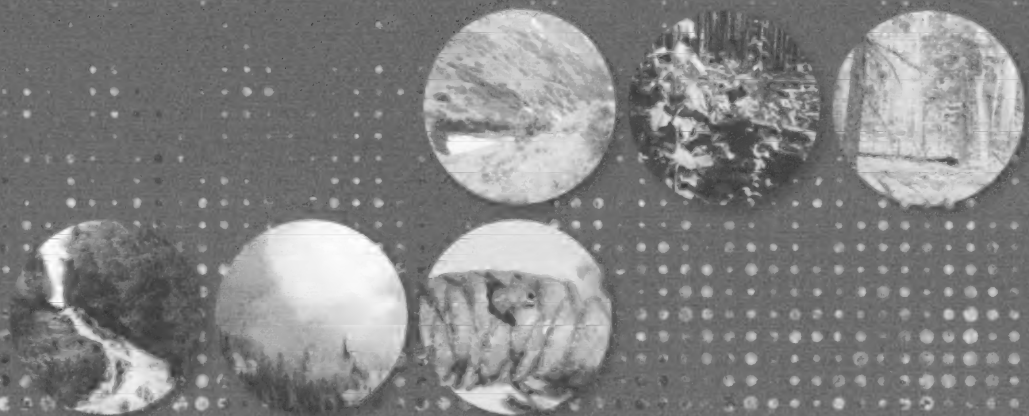
ÉLÉMENTS	INDICATEURS ^a	SENSIBILITÉ ^b	FAISABILITÉ ^c	PRINCIPALES CONSIDÉRATIONS
Précipitations	<i>Précipitations quotidiennes totales (pluie et teneur en eau de la neige) et valeurs dérivées (précipitations totales mensuelles, saisonnières et annuelles).</i>	E	E	<p>La plupart des stations climatologiques mesurent les précipitations totales; certaines stations indiquent séparément les précipitations sous forme de pluie et les précipitations sous forme de neige. Dans la majorité des cas, la période de consignation des données sur les précipitations est la même que celle qui est utilisée pour la température (voir ci-dessus). Les données sur les précipitations sous forme de neige sont très sensibles à la méthode de mesure : certains instruments (comme les pluviomètres à auget basculeur) ne fournissent pas de mesures fiables des chutes de neige. L'épaisseur de la neige a été mesurée à quelques stations climatologiques à compter des années 1950 ou plus tard. La Division des relevés hydrologiques du Canada d'EC consigne des données sur le stock nival, qui sont habituellement complétées par des données de l'industrie à l'échelle provinciale et locale.</p> <p>Comme pour la température, il est nécessaire d'interpoler les données des stations météorologiques portant sur les précipitations pour couvrir l'ensemble du Canada. La formation d'orages convectifs et les effets liés à la topographie font en sorte que les précipitations tendent à être éparpillées, ce qui rend difficile leur interpolation à l'échelle du paysage à partir de données provenant de stations climatologiques qui sont souvent disséminées dans les régions forestières éloignées.</p> <p>Juridictions : De façon générale, l'information fournie est la même que pour les mesures de la température (voir ci-dessus). La plupart des réseaux climatiques (voir l'annexe 1) indiquent les précipitations totales (horaires ou quotidiennes) et fournissent parfois des données sur le stock nival. Les données sur la pluie verglaçante sont moins courantes.</p>
	<i>Accumulation de pluie quotidienne totale.</i>	E	E	
	<i>Accumulation de neige quotidienne totale (épaisseur ou équivalent en eau).</i>	E	M	
	<i>Indicateurs dérivés, comme le nombre de jours sans pluie.</i>	E	M	
	<i>Pluie verglaçante (nombre de jours ou quantité).</i>	M	M	
	<i>Couverture de neige, épaisseur de la neige, densité du stock nival et équivalent en eau.</i>	E	M	
	<i>Période de neige au sol.</i>	E	E	
Phénomènes météorologiques extrêmes	<i>Orages et éclairs (nombre d'orages, densité de la foudre par période).</i>	M	E	<p>Les phénomènes météorologiques extrêmes comme les vents violents, les orages et les éclairs ont des répercussions importantes sur les forêts et sont touchés par les changements climatiques.</p> <p>EC et d'autres institutions mesurent la vitesse et la direction du vent et fournissent habituellement des données sur une base horaire (y compris pour les rafales maximales). Certaines stations climatologiques fournissent des données sur les orages et donc sur le potentiel d'éclairs. Les réseaux de détection de la foudre offrent cependant une plus grande couverture spatiale.</p> <p>La chaleur extrême de même que les gelées précoces et tardives font partie de l'élément Température (voir ci-dessus). La sécheresse est traitée comme une mesure d'intégration (voir ci-dessus).</p> <p>Juridictions : De façon générale, l'information fournie est la même que pour la température (voir ci-dessus). Certaines institutions provinciales de gestion des incendies possèdent des réseaux de détection de la foudre qu'ils mettent en service durant la saison des feux.</p>
	<i>Vents (vitesses moyennes et rafales maximales dépassant un seuil donné) et certains types de tempêtes, comme les tempêtes de grêle, les tornades, les derechos et les ouragans.</i>	M	M	
Indicateurs intégratifs	IFM.	E	E	<p>L'IFM reflète les variations de température, de vent, d'humidité relative et de régime de précipitations. L'IFM est un indice empirique fondé sur des données météorologiques.</p> <p>Début et fin de la période de calcul de l'IFM : mesure au sol de l'apparition et de la disparition de la neige pouvant aussi servir à déterminer la durée de la saison des feux. Voir aussi les sections Précipitations et Feux de forêt.</p> <p>L'application d'autres indices de sécheresse à divers processus biophysiques et pour diverses régions nécessite un examen critique et une évaluation.</p> <p>L'ISSP et les indices connexes sont couramment utilisés en agriculture et peuvent servir d'indicateurs de sécheresse relatifs pour les forêts (les valeurs négatives correspondent aux sécheresses plus graves). Voir aussi la section Conditions météorologiques extrêmes.</p> <p>L'IHC fournit un indicateur absolu et polyvalent concernant les variations annuelles des régimes d'humidité et de la sévérité des sécheresses dans les forêts de l'ouest de la région intérieure du Canada (Hogg, 1997). Voir aussi la section Conditions météorologiques extrêmes.</p> <p>L'IHS (Hogg et coll., 2013) fournit un indicateur des variations saisonnières et à long terme des conditions d'humidité dans les régions forestières éloignées, où les données climatologiques se limitent habituellement aux observations météorologiques de base (température et précipitations seulement). On peut aussi obtenir facilement des estimations modélisées des taux d'humidité du sol mensuels pour n'importe quel endroit dans le monde (1948 à aujourd'hui) à l'aide d'un système d'établissement de rapports sur le Web (Fan et van den Dool, 2004). Voir aussi les sections Température et humidité du sol et Conditions météorologiques extrêmes.</p>
	Début et fin de la période de calcul de l'Indice forêt météo.	E	E	
	Indice de sécheresse de l'IFM. Voir aussi les sections Conditions météorologiques extrêmes et Feux de forêt.	E	E	
	ISSP, cet indice fournit un indicateur de sécheresse relative.	E	E	
	IHC, cet indice est fondé sur le calcul de la différence entre les précipitations annuelles et l'évapotranspiration potentielle (bilan hydrique annuel).	E	E	
	Modèles d'humidité du sol, y compris l'IHS. Voir aussi la section Conditions météorologiques extrêmes.	E	M	

^a Les indicateurs en caractères ordinaires sont issus des ateliers; les indicateurs en italiques proviennent de la revue de littérature scientifique et Internet; les indicateurs en caractères gras proviennent à la fois des ateliers et de la revue de littérature scientifique et Internet.

^b Sensibilité de l'indicateur aux changements climatiques : élevée (E), moyenne (M) ou faible (F).

^c Faisabilité de la mesure dans le cadre d'un système de suivi régional ou national : élevée (E), moyenne (M) ou faible (F).

SYSTÈME FORESTIER



GÉOMORPHOLOGIE ET HYDROLOGIE

En quoi consiste la catégorie Géomorphologie et hydrologie et comment est-elle structurée?

La catégorie Géomorphologie et hydrologie comporte trois éléments principaux : la dynamique de gel-dégel (y compris le pergélisol, les glaciers et les glaces de lac et de rivière), les glissements de terrain et le niveau et la qualité de l'eau (principalement la température) (tableau 2).

En quoi la géomorphologie et l'hydrologie sont-elles liées aux changements climatiques?

Le climat façonne le relief et les systèmes hydrologiques. À leur tour, les caractéristiques de la surface terrestre et les processus physiques se répercutent sur les écosystèmes forestiers. Ainsi, la dynamique de gel-dégel a une incidence sur la structure et le fonctionnement des écosystèmes forestiers de même que sur l'infrastructure de transport. L'évaluation de données mondiales remontant jusqu'en 1970 a été réalisée par le Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (GIEC, 2007). Elle a montré que les systèmes naturels de tous les continents et de presque tous les océans étaient touchés par les changements climatiques à l'échelle régionale, et plus particulièrement par les hausses de température. Dans la présente étude, nous nous sommes cependant limités aux caractéristiques géomorphologiques et aux systèmes physiques les plus pertinents par rapport aux forêts. Les éléments liés aux changements de phase de l'eau entre l'état solide et l'état liquide sont particulièrement importants. À l'échelle mondiale, la plupart des analyses des effets des changements climatiques sur les systèmes physiques portent également sur l'élévation du niveau de la mer, la glace de mer, les marées de tempête et la vulnérabilité des estuaires. Lorsque les forêts se trouvent en bordure de mers ou de lacs, certains de ces éléments peuvent avoir une incidence particulière et nécessiter une étude plus approfondie.

Quels seront les effets des changements climatiques sur la géomorphologie et l'hydrologie et comment pourrait-on les mesurer?

Dynamique de gel-dégel

Le moment de la première et de la dernière chute de neige ainsi que l'englacement et la débâcle sur les cours d'eau et les lacs sont des signes bien visibles des changements de saison qui ont également des répercussions sur les activités quotidiennes touchant directement le secteur forestier (p. ex., les modes de transport ou les méthodes d'exploitation forestière). Dans la plus grande partie des régions de forêt boréale et de taïga, le sol, souvent isolé par une épaisse couche de matière organique, demeure gelé toute l'année. Bien que la productivité des forêts soit souvent limitée par le caractère restreint de la zone d'enracinement saturée,



le dégel estival de sols auparavant gelés peut causer une instabilité considérable de la surface, ce qui peut avoir des conséquences désastreuses sur les routes, les bâtiments, les pistes d'atterrissage, les pipelines et les poteaux électriques. En plus de son impact sur l'intégrité des routes, le cycle de gel-dégel est important à plusieurs égards dans le domaine de la foresterie. Les gelées qui surviennent durant la saison de croissance nuisent à la régénération de certaines espèces et peuvent causer le soulèvement des semis cultivés en conteneurs et nouvellement plantés dans des sols fins (de Chantal et coll., 2009). Il est possible d'élaborer des algorithmes et des indices sur les épisodes de gel-dégel pour diverses applications, telles que la cartographie à l'échelle régionale des conditions météorologiques menant au déclin de la forêt (Bourque et coll., 2005) (voir la section Conditions et processus édaphiques).

Le dégel du pergélisol peut modifier les caractéristiques hydrologiques à l'échelle locale, qui peuvent à leur tour avoir des répercussions sur la stabilité des routes et l'écologie d'une région, y compris sur la croissance des arbres. Il est très difficile de prévoir les effets ultimes des changements climatiques sur le pergélisol et les tourbières. On estime que les tourbières pourraient s'assécher en partie, surtout durant l'été. Ces conditions plus sèches pourraient entraîner la perte de végétation et favoriser l'accumulation de tourbe. Le dégel du pergélisol peut faire remonter de grandes quantités d'eau à la surface (p. ex., Barrow, Alaska) (ACIA, 2004), mais cette humidité pourrait être perdue si l'épaisseur de la couche active augmente, comme on le prévoit. Dans certains sites nordiques de la Suède, le réchauffement climatique a causé le dégel du sol à des profondeurs de plus en plus importantes (ACIA, 2004). Lorsque le pergélisol dégèle, les sols peuvent en fait s'assécher et s'éroder. Comme le dégel du pergélisol peut se produire de manière différentielle et rendre la topographie irrégulière, il est possible qu'il cause l'assèchement de certains étangs, et qu'il en crée de nouveaux. L'épinette noire (*Picea mariana*) est l'essence qui domine dans les zones de pergélisol au Canada. Dans les sites humides, il est possible que la diminution du



Déplacement du glacier Robson, situé dans le Parc provincial Mount Robson, en Colombie-Britannique, de 1911 (photo du haut) à 2011 (photo du bas). (Photo du haut : *Whyte Museum of the Canadian Rockies* (V263/NA 6345), Byron Harmon; photo du bas : Roger Wheate, *University of Northern British Columbia*; source GlacierChange.org.)

niveau de l'eau favorise la croissance des arbres. Dans les zones de pergélisol plus sèches, la croissance de l'épinette noire ralentit souvent lorsque la température s'élève en été. À d'autres endroits, le dégel du pergélisol risque d'entraîner la disparition des épinettes noires (ACIA, 2004).

Le recul des glaciers est l'un des effets les plus connus des changements climatiques. La fonte des glaciers a des répercussions sur les cours d'eau des milieux forestiers dans la plus grande partie de l'ouest du Canada : elle modère la variabilité interannuelle du débit et contribue à augmenter le volume de ruissellement durant les périodes où les conditions sont extrêmement chaudes et sèches. La fonte des glaciers soutient également les fonctions des écosystèmes en rafraîchissant la température de l'eau. Le recul des glaciers modifie déjà les régimes de débit et de température de certains cours d'eau des milieux forestiers en Colombie-Britannique (Moore et coll., 2009). Les mêmes tendances existent probablement en Alberta (Bolch et coll., 2010) et elles auront sans doute des effets significatifs sur les écosystèmes dulcicoles et estuariens et sur les espèces aquatiques.

La persistance des glaces sur les lacs et les rivières ainsi que la couverture de glace de surface en général sont étroitement liées à la température de l'air à l'automne et au printemps. Son impact sur les forêts se fait surtout sentir sur les voies de transport dans les régions nordiques. L'analyse des tendances concernant l'englacement et la débâcle des lacs et des rivières au Canada du milieu des années 1960 au milieu des années 1990 montre des différences marquées selon les saisons, la date d'englacement ayant peu varié (certaines données indiquent cependant que la formation de glace sur les rivières est plus précoce dans l'est du Canada), mais la débâcle se produit de façon générale notablement plus tôt au printemps (Zhang et coll., 2001; Duguay et coll., 2006). Ces résultats concordent avec les tendances observées pour les températures à l'automne et au printemps. Une analyse plus récente des tendances en matière d'englacement et de débâcle, réalisée pour une quarantaine de lacs du Canada entre 1970 et 2004 à l'aide de données d'observation *in situ* et de données satellitaires, fournit de nouvelles données montrant que l'englacement de plusieurs lacs se produit notablement plus tard (Latifovic et Pouliot, 2007). Le profil spatial des tendances concernant la date de dégel de 1950 à 2005 indique que les sites où la débâcle se produit significativement plus tôt sont généralement situés dans l'ouest du Canada, ce qui concorde avec le profil spatial des stations climatologiques montrant un réchauffement significatif au printemps (Zhang et coll., 2011).

Glissements de terrain

Les changements climatiques peuvent avoir une incidence sur les précipitations, la fonte des neiges et la végétation en modifiant la fréquence ou l'ampleur des mouvements de masse et des épisodes d'érosion pouvant se répercuter sur le couvert forestier. Bien que les caractéristiques géologiques sous-jacentes soient indépendantes du climat, les changements climatiques peuvent modifier les matériaux de surface (modification des sols, de l'hydrologie et de la végétation) ainsi que la végétation, et donc avoir une incidence sur les mouvements de masse, en raison du dégel du pergélisol (voir ci-dessus) et des changements touchant la fréquence de la saturation du sol. Des données indiquent l'existence d'un lien entre les glissements de terrain et les changements climatiques en général, et certains phénomènes météorologiques en particulier (Geertsema et coll., 2007).

Niveau et qualité de l'eau

Dans les systèmes hydrologiques, les changements liés au climat peuvent entraîner la modification des caractéristiques physiques, chimiques et biologiques de l'eau des cours d'eau et des lacs situés en milieu forestier. Il est possible que ces changements aient des effets sur les écosystèmes dulcicoles et estuariens ainsi que sur les espèces aquatiques des forêts, et plus particulièrement sur des espèces de poisson comme les truites et les saumons (*Oncorhynchus* spp.), qui passent

des années dans les cours d'eau situés en milieu forestier au cours de leur existence. La baisse des débits prévue durant l'été et au début de l'automne pourrait réduire la quantité d'eau disponible dans les écosystèmes forestiers. Par ailleurs, il se peut que l'augmentation de la fréquence des tempêtes et des quantités de précipitations qui est prévue en raison des changements climatiques entraîne une augmentation du volume d'eau et de la vitesse du courant dans certaines régions durant l'hiver, ce qui pourrait causer une augmentation de la turbulence, de l'affouillement et des charges sédimentaires des cours d'eau, une diminution de la stabilité du chenal des cours d'eau ainsi que des dommages aux habitats aquatiques des milieux forestiers. La faiblesse des débits pourrait causer

une hausse de la température de l'eau et une baisse de sa qualité, deux facteurs qui constitueraient une menace pour la santé des écosystèmes aquatiques (Brooks, 2009). On s'attend à ce que la hausse des températures affecte l'état, le taux de survie et le succès de reproduction de certaines espèces de poisson et d'autres espèces aquatiques (p. ex., Manomet Center for Conservation Sciences, 2010). La composition chimique de l'eau, malgré son importance pour la qualité de l'eau, n'a pas été retenue comme indicateur possible. En effet, la composition chimique de l'eau peut être modifiée par les changements climatiques, mais aussi par un grand nombre d'autres facteurs.

Tableau 2. Indicateurs de la géomorphologie et de l'hydrologie

ÉLÉMENTS	INDICATEURS ^a	SENSIBILITÉ ^b	FAISABILITÉ ^c	PRINCIPALES CONSIDÉRATIONS
Dynamique de gel-dégel Pergélisol	Profondeur de la couche dégelée/active.	E	M	Le pergélisol est très sensible aux changements climatiques, mais l'échantillonnage du pergélisol sur de grandes superficies soulève des difficultés; un plan d'échantillonnage spatial détaillé doit donc être établi. Il est possible d'échantillonner des étangs, des glaciers, et même le pergélisol dégelé à distance. Juridictions : Dans la plupart des provinces et territoires nordiques, on effectue des mesures (ou l'on se propose de le faire) sur la dynamique du pergélisol, les glaces des lacs et des rivières et le comportement des glaciers.
	Étendue et répartition des zones dégelées.	E	M	
	Changements touchant la production de gaz à effet de serre et les propriétés du sol et de la végétation (p. ex., perte de pales arborées).	M	F	
	Superficie et emplacement des forêts subissant les effets du dégel du pergélisol (thermokarst), y compris les inondations, le feuillage chlorotique, les « forêts ivres » et les mouvements de masse.	E	M	
	Nombre et superficie des étangs dans les zones de pergélisol.	E	M	
Dynamique de gel-dégel Glaces de lac et de rivière	Date de la première fonte.	E	F	Les glaces de lac et de rivière sont assez sensibles aux changements climatiques et peuvent être mesurées. Il existe un lien entre la durée des glaces et les problèmes de transport dans les régions nordiques, mais la durée des glaces n'affecte pas directement les arbres. Elle a des répercussions sur les poissons et les autres animaux aquatiques en milieu forestier. EC a déjà assuré le suivi des glaces sur les lacs et les rivières dans le cadre d'un programme, mais se concentre désormais uniquement sur les routes de navigation. L'information sur les lacs est actuellement recueillie par des bénévoles.
	Date à laquelle les eaux sont libres de glace (rivières et lacs complètement libres de glace).	E	E	
	Date de la première glace pérenne.	E	F	
	Date à laquelle la couverture de glace est complète.	E	M	
Dynamique de gel-dégel Glaciers	Superficie des glaciers.	E	E	Le recul des glaciers est l'un des effets les plus connus des changements climatiques. Ce phénomène a une incidence sur le débit et la température de l'eau, mais ses effets sur les forêts ne sont qu'indirects. Le Canada a déjà mis sur pied un réseau de surveillance des glaciers faisant appel à des techniques de télédétection pour déterminer les changements. Des chercheurs universitaires continuent d'assurer une certaine surveillance. Le volume et la masse sont plus difficiles à déterminer que la superficie.
	Volume ou masse des glaciers.	E	M	
Glissements de terrain	Ampleur des glissements de terrain par emplacement.	M	F	La détection des tendances pose des difficultés dans le cas des phénomènes rares, comme les mouvements de masse. En outre, étant donné que plusieurs facteurs de confusion (effets liés à l'utilisation des terres plutôt qu'au climat) empêcheraient ou bousilleraient l'interprétation des effets des changements climatiques, il serait difficile d'utiliser les mouvements de masse comme indicateur. Enfin, on ne dispose actuellement d'aucune donnée pouvant appuyer la surveillance de cet indicateur, mis à part des études de cas. Comme pour tout indicateur de fréquence des perturbations, on doit disposer d'une grande zone de référence où les efforts de surveillance doivent être répartis équitablement. Juridictions : Certains pays très montagneux (comme l'Autriche) surveillent les glissements de terrain.
	Fréquence des glissements de terrain.	M	F	
	Nombre/superficie des creux de déflation sableux et autres zones dénudées.	M	F	

^a Les indicateurs en caractères ordinaires sont issus des ateliers; les indicateurs en italiques proviennent de la revue de littérature scientifique et Internet; les indicateurs en caractères gras proviennent à la fois des ateliers et de la revue de littérature scientifique et Internet.

^b Sensibilité de l'indicateur aux changements climatiques : élevée (E), moyenne (M) ou faible (F).

^c Faisabilité de la mesure dans le cadre d'un système de suivi régional ou national : élevée (E), moyenne (M) ou faible (F).

(à suivre)

Tableau 2. (suite et fin)

ÉLÉMENTS	INDICATEURS ^a	SENSIBILITÉ ^b	FAISABILITÉ ^c	PRINCIPALES CONSIDÉRATIONS
Niveau et qualité de l'eau	Débîts des cours d'eau (y compris les débîts élevés et les débîts faibles).	E	M	<p>Le débî et la température de l'eau sont des facteurs importants pour les espèces de poisson qu'on trouve en milieu forestier et sont très sensibles aux changements climatiques.</p> <p>La Division des relevés hydrologiques du Canada d'EC mesure le débî de l'eau à de nombreux endroits, de même que la qualité et la température de l'eau à un nombre moins élevé de stations. Les mesures ne sont pas souvent effectuées dans des milieux non perturbés ou des endroits qui sont représentatifs des écosystèmes forestiers. Les données sur les petits cours d'eau en milieu forestier sont rares.</p> <p>Les placettes de l'Inventaire forestier national (IFN) et les données de télédétection peuvent permettre de surveiller les changements touchant les milieux humides. L'évapotranspiration et le stockage de l'eau ainsi que la libération et la séquestration du carbone (C) associés aux changements touchant les milieux humides sont des facteurs intéressants, mais plus difficiles à estimer que les changements touchant la taille, le type ou la profondeur des milieux humides. Il faut disposer de données à très long terme pour pouvoir distinguer adéquatement les tendances dues aux changements climatiques des tendances attribuables au changement de phase (froid à chaud) de l'oscillation décennale du Pacifique.</p> <p>Juridictions : Le débî de l'eau est couramment mesuré, pour quelques territoires, on mesure la température et la qualité de l'eau, mais on indique habituellement que les mesures de la qualité de l'eau fourniraient des renseignements utiles.</p>
	Taille des milieux humides et des lacs (superficie, débî entrant, profondeur), végétaux des milieux humides en bordure des lacs; changement de type de milieu humide ou transition de tourbière à forêt ou inversement.	E	M-F	
	Évapotranspiration et ruissellement annuels dans les bassins versants.	E	F	
	Température de l'eau (surface et sous la surface).	E	F	

^a Les indicateurs en caractères ordinaires sont issus des ateliers; les indicateurs en italiques proviennent de la revue de littérature scientifique et Internet; les indicateurs en caractères gras proviennent à la fois des ateliers et de la revue de littérature scientifique et Internet.

^b Sensibilité de l'indicateur aux changements climatiques : élevée (E), moyenne (M) ou faible (F).

^c Faisabilité de la mesure dans le cadre d'un système de suivi régional ou national : élevée (E), moyenne (M) ou faible (F).

PERTURBATIONS NATURELLES

En quoi consiste la catégorie Perturbations naturelles et comment est-elle structurée?

La catégorie Perturbations naturelles comprend à la fois les perturbations physiques, comme les perturbations liées aux conditions météorologiques extrêmes et aux feux, et les perturbations biotiques, comme les infestations d'insectes et d'agents pathogènes. Il est à noter que les phénomènes météorologiques extrêmes tels que les sécheresses, les tempêtes de vent, les tempêtes de verglas, les épisodes hivernaux de gel-dégel et les gelées inhabituelles pour la saison sont traités dans la catégorie Facteurs climatiques. La présente catégorie porte sur les perturbations des écosystèmes résultant de ces phénomènes météorologiques extrêmes. On y traite plus en profondeur du déracinement et de la chute d'arbres par le vent, des dommages causés par la grêle, du dépérissement d'arbres à la suite d'épisodes de gel-dégel et de la sécheresse, qui peut être considérée comme une perturbation naturelle lorsqu'elle est suffisamment grave pour entraîner une mortalité massive des arbres et des signes bien visibles de dépérissement du houppier (Michaelian et coll., 2011). Les effets plus répandus et plus subtils des sécheresses, comme le ralentissement de la croissance et de la régénération des arbres et l'augmentation du taux de « mortalité de fond » (van Mantgem et coll., 2009), sont traités dans la catégorie Dynamique des peuplements forestiers. La catégorie Perturbations naturelles comprend quatre éléments : les conditions météorologiques extrêmes, les feux de forêt, les infestations d'insectes forestiers et les agents pathogènes (tableau 3).

En quoi les perturbations naturelles sont-elles liées aux changements climatiques?

Avec les changements climatiques, on s'attend à une augmentation de la fréquence, de l'importance et de la sévérité des perturbations naturelles dans la plupart des régions du Canada (Dale et coll., 2001; Flannigan et coll., 2005; Haughian et coll., 2012), ce qui entraînera de profonds changements dans le fonctionnement des écosystèmes ainsi que des répercussions à grande échelle sur les écosystèmes forestiers, le secteur forestier et la société canadienne en général. Les effets sur le plan écologique des perturbations naturelles se répercutent aussi sur le plan socioéconomique, qu'il s'agisse de la perturbation de l'approvisionnement en bois, de l'augmentation du taux de chômage ou de menaces pour la sécurité, le logement et la propriété. Selon leur sévérité, les vents violents, la grêle et les tempêtes de verglas peuvent causer la mortalité d'arbres et créer des ouvertures dans le couvert forestier, et ainsi modifier la structure de la forêt. Les feux de forêt touchent non seulement les écosystèmes forestiers et l'approvisionnement en bois, mais aussi la santé humaine et la sécurité, notamment dans les collectivités forestières situées en milieu périurbain. Les insectes ravageurs



des forêts, principalement les scolytes (*Curculionidae* : *Scolytinae*), les insectes défoliateurs et les espèces exotiques, peuvent causer une mortalité à grande échelle et modifier la nature de la forêt sur de vastes superficies. Les changements climatiques auront probablement des effets sur plusieurs types de perturbations dont l'action combinée se fera sentir sur les forêts (McKenzie et coll., 2009). La combinaison des effets de plusieurs perturbations donne parfois des résultats inattendus et sans précédent (Dale et coll., 2001). Par exemple, une sécheresse peut réduire la vigueur des arbres et les rendre plus vulnérables aux infestations d'insectes et aux maladies. Il est alors possible que ces perturbations favorisent les feux de forêt en entraînant une augmentation de la charge de combustible. Les feux de forêt causent des dégagements de fumée pouvant nuire à la santé humaine. De plus, les perturbations naturelles ont une incidence sur la quantité de carbone stockée dans les forêts : il a été établi que la décomposition des arbres constituait une source importante de carbone (voir aussi la section Éléments humains liés aux forêts).

Quels seront les effets des changements climatiques sur les perturbations naturelles et comment pourrait-on les mesurer?

Conditions météorologiques extrêmes

Les vents violents, notamment ceux des ouragans, des tornades et des derechos, peuvent renverser les arbres dans de grands secteurs de forêt (Ashley et Mote, 2005). Le déracinement des arbres par le vent peut aussi être favorisé par d'autres facteurs, comme un sol détrempé ou le poids de la neige sur les branches. Les vents d'été, en plus de causer des déracinements, sont souvent associés à des orages et jouent un rôle dans le développement et la vitesse de propagation du feu. De nombreuses études ont été réalisées sur les risques de déracinement ou de renversement par le vent (chablis) et les effets des vents extrêmes sur les peuplements forestiers, mais l'incidence des changements climatiques sur le risque de déracinement a rarement été évaluée. Haughian et coll.

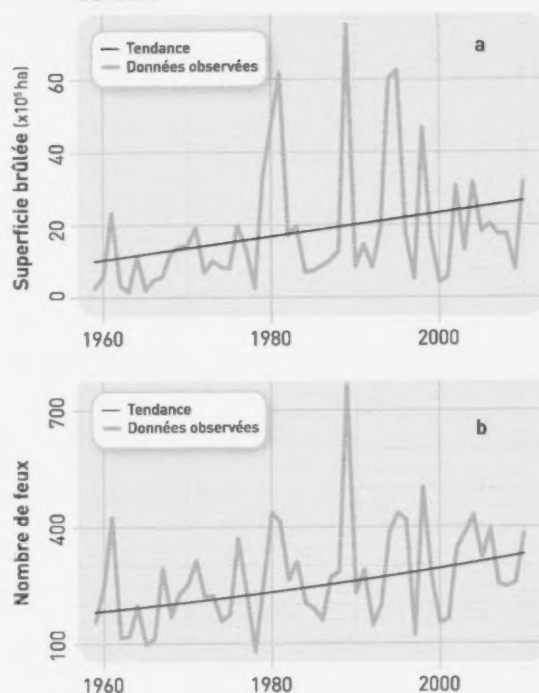
(2012) ont toutefois prévu une diminution des vitesses des vents extrêmes durant l'été dans le sud de la Colombie-Britannique, combinée à une augmentation de la fréquence des vents extrêmes au cours des autres saisons et dans d'autres régions. En Finlande, Peltola et coll. (1999) ont avancé que les changements climatiques auraient une incidence non seulement sur les vents, mais aussi sur les conditions d'enracinement des arbres. Ainsi, l'absence de sols gelés peut augmenter les risques de déracinement par le vent. Les modèles des changements climatiques actuels ne prédisent pas directement la force des vents à l'échelle locale (Sailor et coll., 2008). Les tempêtes de grêle causent parfois de graves dommages aux forêts (Riley, 1953) et leurs conséquences sont préoccupantes pour les institutions forestières locales (Gillis et coll., 1990). La tempête de verglas survenue en janvier 1998 a causé des dommages importants dans les forêts de feuillus sur une superficie de 2,4 millions d'hectares dans le sud-est de l'Ontario et le sud du Québec (Hopkin et coll., 2003), montrant l'importance que peut avoir ce type de perturbation dans l'est du Canada. Ces phénomènes météorologiques extrêmes résultent de conditions climatiques de mésosécherelle et peuvent donc être touchés par les changements climatiques.

Les changements climatiques pourraient déjà être à l'origine d'une augmentation des épisodes hivernaux de gel-dégel, qui sont l'une des causes reconnues du dépérissement et du déclin d'essences de feuillus comme le bouleau jaune (*Betula alleghaniensis*) (Bourque et coll., 2005) et diverses espèces de peupliers (*Populus* spp.) (Hogg et coll., 2002a). D'autres dommages liés au climat comprennent la dessiccation hivernale des conifères, notamment dans les contreforts de l'ouest de l'Alberta (Bella et Navratil, 1987). En raison de la diminution à long terme de l'épaisseur de la neige au début du printemps, le gel peut, dans certains cas, endommager les racines et causer le déclin de la forêt, comme cela s'est produit dans les forêts de cyprès jaune (*Chamaecyparis nootkatensis*), le long de la côte du Pacifique en Alaska et dans le nord de la Colombie-Britannique (Hennon et coll., 2005). De façon globale, l'augmentation prévue de la fréquence des températures inhabituelles pour la saison (élevées ou basses) pourrait être néfaste pour les écosystèmes forestiers. Il n'est pas nécessaire que la fréquence ou la sévérité des gelées printanières change pour que les tissus fragiles des végétaux subissent des dommages si le débourrement des bourgeons se produit plus tôt à cause du changement climatique (Gu et coll., 2008).

Feux de forêt

Les changements touchant les taux annuels de brûlage sont en partie attribuables au climat (Gavin et coll., 2007) et subissent les effets conjugués de l'exploitation forestière, de l'extinction des incendies, de l'accumulation et du traitement des matières combustibles, des insectes (Parker et coll., 2006; Stephens et coll., 2009; Naficy et coll., 2010) et d'autres

Canada



Tendances pour (a) les superficies brûlées (en hectares) et (b) pour le nombre de grands feux (> 200 ha) au Canada, de 1959 à 2010 (Yan Boulanger, Ressources naturelles Canada).

perturbations naturelles. Selon plusieurs études, la fréquence des feux est susceptible d'augmenter de façon considérable dans diverses régions du Canada (Girardin et Mudelsee, 2008; Bergeron et coll., 2010; Wotton et coll., 2010; Boulanger et coll. 2012). Les nombreuses études réalisées sur les feux en forêt boréale font état de diverses tendances historiques des taux, à la hausse ou à la baisse (Xiao et Zhuang, 2007; Meyn et coll., 2010). Cette variation est probablement liée à l'emplacement géographique (tendance souvent à la baisse dans l'est du Canada et à la hausse dans l'Ouest) et à l'échelle temporelle (augmentations récentes, diminutions à plus long terme). Les printemps hâtifs et les étés secs peuvent faire augmenter les risques de feux de forêt importants. Il est également possible que l'intensité et la sévérité des feux changent à la suite de sécheresses fréquentes et sévères ou d'infestations d'insectes (Hadley et Veblen, 1993; Page et Jenkins, 2007; Simard et coll., 2011). La mortalité d'arbres due au feu pourrait annuler, à l'échelle des forêts, tout gain de productivité découlant du réchauffement climatique.

Infestations d'insectes forestiers

La température influe sur presque tous les aspects du cycle vital des insectes et des processus en jeu à l'échelle des populations, tels que le taux de développement, les fluctuations saisonnières

et le voltinisme (nombre de générations par année) (Tobin et coll., 2008). Le climat constitue donc un facteur important dans la définition de l'aire de répartition de la plupart des espèces d'insectes des régions tempérées. On a déjà signalé l'adaptation génétique rapide des insectes aux variations de températures saisonnières, et de nombreux cas d'expansion de l'aire de répartition ont été notés, des espèces s'étant établies dans de nouveaux milieux rendus propices par l'augmentation des températures (Bentz et coll., 2010; Règnière et coll., 2012a). Lorsque l'aire de répartition d'espèces nuisibles change, les espèces tant indigènes qu'exotiques peuvent causer de graves dommages dans des secteurs où elles n'étaient pas présentes auparavant, car l'écosystème peut être mal adapté à ce type de perturbation. En conséquence, la période d'émergence des insectes et de débourrement des bourgeons des plantes hôtes peut constituer un indicateur approprié de la réponse des insectes et des végétaux à l'augmentation de la température ambiante due aux changements climatiques.

Selon des données recueillies, le réchauffement climatique a joué un rôle majeur dans l'infestation récente et sans précédent de scolytes qui a affecté de vastes régions de l'ouest de l'Amérique du Nord (Raffa et coll., 2008; Bentz et coll., 2010; Safranyik et coll., 2010). Certains insectes défoliateurs (tordeuses [Tortricidae] et arpenteuses [Geometridae]), qui peuvent aussi causer des dommages à grande échelle, subissent l'influence des températures élevées au stade larvaire. La valeur d'adaptation (*fitness*) des insectes défoliateurs et la sévérité des dommages qu'ils infligent dépendent du synchronisme avec le débourrement des bourgeons des plantes hôtes. Certaines espèces d'insectes, comme les scolytes, réagissent plutôt directement au climat et peuvent se mettre à proliférer lorsque les conditions météorologiques sont favorables, à condition que leur hôte soit présent. D'autres espèces (p. ex., de nombreuses espèces de tordeuses) dépendent davantage de leur hôte, et leurs effectifs ont un caractère plus cyclique, peu importe les conditions météorologiques. Les réactions des insectes aux changements climatiques se caractérisent par un degré élevé de complexité et d'incertitude, car leurs populations subissent l'influence directe des variations de température et l'influence indirecte des effets des changements climatiques sur les espèces associées au sein des communautés et sur les arbres qui servent d'hôtes. Ces changements climatiques ne surviendront pas de façon uniforme au fil des ans, et les processus dépendants de la température ne seront pas tous également touchés. La dynamique résultante dépendra à la fois de la complexité des réponses des processus physiologiques aux facteurs climatiques et des interactions entre les espèces.

Agents pathogènes

L'incidence des changements climatiques sur la dynamique future des agents pathogènes forestiers demeure incertaine, notamment en raison de la complexité des interactions hôte agent pathogène (Sturrock et coll., 2011). Le dénominateur

commun de la plupart des réponses des agents pathogènes forestiers aux changements climatiques semble être un changement dans la relation entre la température et les précipitations ou l'humidité du sol ou dans la répartition saisonnière de ces variables. De nombreux champignons profitent de la chaleur et de l'humidité, mais ils dépendent aussi de la santé des arbres qui leur servent d'hôtes (Lonsdale et Gibbs, 1996). On s'attend donc à ce que les effets des agents pathogènes forestiers indigènes et introduits sur les forêts canadiennes s'amplifient de concert avec l'augmentation prévue des sécheresses et d'autres facteurs de stress abiotiques. Les impacts des changements climatiques sont plus prévisibles pour les groupes d'espèces d'agents pathogènes dont le cycle biologique est directement touché par les conditions climatiques, et plus particulièrement par les variations de température et d'humidité. Les rouilles, par exemple, bénéficient des périodes d'humidité élevée. Il est possible que les sécheresses favorisent certaines maladies foliaires et qu'une humidité élevée en favorise d'autres (Kliejunas et coll., 2009). Par ailleurs, l'incidence des conditions climatiques est indirecte pour les agents pathogènes comme les *Armillaria* spp. qui causent des maladies racinaires chez les arbres des forêts. Ces agents pathogènes sont davantage touchés par les niveaux de stress que subissent les arbres hôtes (Kliejunas et coll., 2009; Lowther, 2010; Sturrock et coll., 2011). La plupart des auteurs croient cependant que le réchauffement climatique fera augmenter la fréquence et la sévérité des pourritures des racines. Bien que les données empiriques dont on dispose soient limitées, il se peut qu'une augmentation de la concentration de dioxyde de carbone atmosphérique (CO₂) et de la croissance des racines entraîne une augmentation de la sévérité et de la fréquence des maladies racinaires. Une expansion des systèmes racinaires favoriserait en effet la probabilité d'invasion (O'Neill, 1994), qui pourrait être compensée par une augmentation de la vigueur des plantes et de leur résistance aux maladies (Runion et coll., 1994).

La prévision des effets des changements climatiques sur le comportement de plusieurs agents pathogènes pose des défis et présente un degré d'incertitude élevé, car leur incidence est directement liée aux précipitations, qui sont beaucoup plus difficiles à prévoir que la température (GIEC, 2007). Même si les prévisions étaient moins variables, le fait est que la plupart des modèles climatiques produisent des données selon des échelles saisonnières ou mensuelles, alors que les organismes pathogènes sont sensibles aux régimes de précipitations à plus court terme (Weltzin et coll., 2003). Malgré ces complications, on s'attend généralement à ce que la répartition géographique de certains agents pathogènes s'élargisse sous l'effet des changements climatiques qui rendront les conditions favorables à ces espèces. Les éclosions de maladies devraient donc être plus fréquentes et se produire à plus grande échelle. Il sera alors important de suivre les changements réels (plutôt que de se fier à des modèles). On peut difficilement prévoir

dans quelle direction et à quel endroit certaines maladies se propageront, compte tenu de leur grande dépendance à l'égard de phénomènes météorologiques précis pouvant se produire selon de nombreux scénarios des changements climatiques. Certaines maladies pourront apparaître ou survenir plus fréquemment, alors que d'autres seront moins présentes. Woods et coll. (2005) ont publié des données sur une augmentation de la mortalité du pin tordu (*Pinus contorta*), dans le centre-nord de la Colombie-Britannique,

due la brûlure des aiguilles, une maladie causée par le champignon *Dothistroma septosporum*. Les changements touchant la répartition, la fréquence et les effets des agents pathogènes pourraient servir d'indicateurs des changements climatiques. Le suivi de ces changements devrait permettre d'intervenir rapidement pour limiter la propagation et les effets des maladies, et de rendre compte des changements potentiels concernant l'approvisionnement en bois pouvant être récolté.

Tableau 3. Indicateurs des perturbations naturelles

ÉLÉMENTS	INDICATEURS ^a	SENSIBILITÉ ^b	FAISABILITÉ ^c	PRINCIPALES CONSIDÉRATIONS
Conditions météorologiques extrêmes	<i>Chablis - étendue, type (paysage ou peuplement), fréquence et moment.</i>	M	M	<ul style="list-style-type: none"> Les vents violents, la grêle et les tempêtes de verglas peuvent avoir des répercussions significatives sur les forêts et sont sensibles aux changements climatiques. EC et d'autres institutions conservent des données sur les vents aux stations climatologiques, mais les vents et leurs effets sur les forêts sont mesurés uniquement à quelques sites dans le cadre de projets de recherche. De nombreuses entreprises surveillent les dommages causés par les vents afin de pouvoir récupérer le bois, mais ne diffusent pas nécessairement leurs données. Dans certaines provinces, on effectue des relevés aériens qui permettent de détecter les zones importantes de chablis. De nombreux facteurs autres que les conditions météorologiques ou climatiques influent sur les chablis qui se produisent dans les peuplements. Les études sur les chablis touchant les paysages sont plus susceptibles de permettre l'établissement de liens avec les tendances climatiques, surtout si elles sont réalisées dans des régions qui ne sont pas perturbées par l'activité humaine. Mais encore là, il faut disposer de données sur une longue période pour pouvoir établir les tendances ou déterminer les causes des phénomènes extrêmes qui sont relativement rares (comme les déracinements par le vent). Juridictions : Dans plusieurs pays, on mesure la vitesse des vents, mais peu de pays signalent systématiquement les dommages dus au vent. L'Institut forestier européen a mis sur pied une base de données sur les perturbations des forêts en Europe (Schelhaas et coll., 2003).
	Étendue et sévérité des dommages causés aux forêts par la grêle et les tempêtes de verglas.	M	M	
	Étendue et sévérité des dommages causés aux forêts par la sécheresse.	E	M	
	Dommages causés par des gelées inhabituelles pour la saison.	E	M	
Feux de forêt	Superficie brûlée/superficie du feu.	M	E	<ul style="list-style-type: none"> Les feux sont mesurables et sensibles aux changements climatiques, et ils ont des effets significatifs sur les ressources forestières et les collectivités tributaires de la forêt. Au Canada, la plupart des mesures sont effectuées par les institutions provinciales et territoriales responsables des ressources naturelles. Il devrait être relativement simple de suivre les tendances au moyen d'un ensemble de données sur les grands feux remontant jusqu'en 1959. Les feux, comme toute perturbation stochastique, seront plus difficiles à associer à un effet direct du signal climatique qu'à des phénomènes météorologiques ou d'autres facteurs (exploitation forestière, extinction des incendies, insectes, traitement des combustibles, etc.). Le Système canadien d'information sur les feux de végétation produit quotidiennement des cartes nationales de l'IFM fondées sur l'interpolation spatiale des données météorologiques à l'échelle du Canada. Des systèmes semblables sont utilisés par les institutions provinciales de gestion des feux. Juridictions : Les débuts des feux (nombre) et l'étendue des feux (superficie brûlée) sont généralement signalés annuellement; dans certains territoires ou autorités, on mesure la sévérité des feux, qui peut aussi être estimée au moyen de techniques de télédétection.
	Sévérité/intensité du feu.	E	F	
	Nombre de feux.	E	M	
	Moment où surviennent les feux/saison des feux.	E	E	
	Composantes de la Méthode de l'IFM (voir aussi la section Facteurs climatiques).	E	M	
	Consommation de combustible, profondeur de brûlage, fréquence des feux.	M	F	
	Émissions de CO ₂ , d'autres gaz à effet de serre et de fumée produites par les feux de forêt. Voir aussi la section Santé humaine.	M	F	
	Dénombrement des points chauds (détectés et signalés quotidiennement par le spectroradiomètre imageur à résolution moyenne) et durée de la période durant laquelle il y a des feux.	M	E	

^a Les indicateurs en caractères ordinaires sont issus des ateliers; les indicateurs en italiques proviennent de la revue de littérature scientifique et Internet; les indicateurs en caractères gras proviennent à la fois des ateliers et de la revue de littérature scientifique et Internet.

^b Sensibilité de l'indicateur aux changements climatiques : élevée (E), moyenne (M) ou faible (F).

^c Faisabilité de la mesure dans le cadre d'un système de suivi régional ou national : élevée (E), moyenne (M) ou faible (F).

(à suivre)

Tableau 3. (suite et fin)

ÉLÉMENTS	INDICATEURS ^a	SENSIBILITÉ ^b	FAISABILITÉ ^c	PRINCIPALES CONSIDÉRATIONS
Infestations d'insectes forestiers	Changements touchant la répartition, la fréquence et la sévérité des infestations des principales espèces d'insectes forestiers pour lesquelles on dispose de données à long terme, comme la tordeuse des bourgeons de l'épinette (<i>Choristoneura fumiferana</i>), la livrée des forêts (<i>Malacosoma disstria</i>) et les scolytes. Voir aussi la section Déplacements d'aires de répartition de taxons d'animaux d'importance particulière.	E	M	<p>Les insectes sont très sensibles aux conditions climatiques et peuvent causer des dommages ayant des répercussions économiques importantes dans de vastes zones forestières.</p> <p>- Le SCF effectuant par le passé des enquêtes annuelles sur les insectes et les maladies à l'échelle nationale, depuis la fin des années 1990, ces enquêtes sont réalisées par les provinces (Westfall et Ebata, 2010).</p> <p>- Les placettes photographiques de l'IFN comportent une strate montrant les dommages causés par les insectes; les espèces ne sont toutefois pas identifiées.</p> <p>- Il faudrait prendre en considération les interactions entre les différents types de perturbations naturelles, comme les feux et les insectes (Fleming et coll., 2002), ainsi que les effets cumulatifs des régimes de perturbations naturelles, des facteurs abiotiques et des changements dans l'utilisation des terres.</p> <p>Juridictions : Dans presque tous les territoires ou sous toutes les autorités, on mesure et on analyse les dommages causés par les insectes et les infestations d'insectes (voir l'annexe 1), mais les normes et les protocoles de mesure sont très variables. À l'échelle internationale, on trouve des exemples notables de programmes bien établis visant la surveillance de la santé des forêts (p. ex., le US Forest Inventory and Analysis National Program et le National Forest Health Monitoring Program aux États-Unis, et l'International Co-operative Program on Assessment and Monitoring of Air Pollution Effects on Forests en Europe). Les activités de recherche et de surveillance dans ce domaine font partie des forces du SCF.</p>
	Ampleur des infestations par espèce d'insecte et par hôte (particulièrement pour les scolytes et les défoliateurs, mais aussi pour de nouvelles espèces exotiques et pour d'autres espèces).	E	M	
	Sévérité des infestations.	M	F	
	Moment où surviennent les infestations.	M	M	
	Fréquence des infestations.	M	M	
	Asynchronisme (d'un insecte par rapport à l'arbre hôte; stades d'hivernation du cycle vital, etc.).	M	F	
	Cartographie annuelle de la défoliation et de la mortalité. Voir aussi la section Mortalité.	E	M	
	Évaluation de l'impact des insectes au moyen d'évaluations parcellaires et d'analyses des anneaux de croissance. Voir aussi la section Croissance.	M	M	
Agents pathogènes	Volitinisme des insectes ravageurs. Voir aussi la section Phénologie des insectes.	M	F	<p>- Les maladies sont sensibles aux conditions climatiques et peuvent causer des dommages ayant des répercussions économiques importantes dans des zones forestières assez grandes.</p> <p>- Le SCF effectuant par le passé des enquêtes sur les insectes et les maladies; en Colombie-Britannique, les autorités provinciales ont pris le relais (Westfall et Ebata, 2010). D'autres provinces pourraient avoir mis sur pied des programmes similaires.</p> <p>- L'analyse des données historiques sur la répartition et l'éclosion des maladies permettrait d'évaluer la fréquence des maladies, et les changements qui se sont produits au fil du temps, en ce qui concerne la répartition des agents pathogènes.</p> <p>Juridictions : Dans de nombreux territoires ou autorités, on mesure et on analyse l'ampleur des infections et les dommages causés par les agents pathogènes.</p>
	Ampleur des infections par espèce et par hôte.	E	M	
	Sévérité des infections.	E	M	
	Moment où surviennent les infections.	E	M	
	Fréquence des infections.	E	M	
	Changements significatifs touchant la mortalité des arbres et les pertes de volume causées par les agents pathogènes indigènes. Voir aussi la section Mortalité.	E	M	
	Changements touchant la répartition des agents pathogènes (p. ex., le champignon <i>Phellinus tremulae</i> chez le peuplier faux-tremble) et leur fréquence (rouilles, brûlure des aiguilles causée par le <i>Dothistroma septosporum</i> , champignon <i>Armillaria ostoyae</i>).	E	M	
	Degré de dommages causés à l'hôte (p. ex., échelle d'évaluation des dommages, Edwards 1991).	E	F	

^a Les indicateurs en caractères ordinaires sont issus des ateliers; les indicateurs en italiques proviennent de la revue de littérature scientifique et Internet; les indicateurs en caractères gras proviennent à la fois des ateliers et de la revue de littérature scientifique et Internet.

^b Sensibilité de l'indicateur aux changements climatiques : élevée (E), moyenne (M) ou faible (F).

^c Faisabilité de la mesure dans le cadre d'un système de suivi régional ou national : élevée (E), moyenne (M) ou faible (F).

PHÉNOLOGIE DES ESPÈCES

En quoi consiste la catégorie Phénologie des espèces et comment est-elle structurée?

La présente catégorie traite des effets du climat sur la phénologie (moment où surviennent les phénomènes biologiques saisonniers) des végétaux (arbres et plantes du sous-bois) et des animaux (principalement les oiseaux, mais aussi les insectes et d'autres vertébrés) (tableau 4).

En quoi la phénologie des espèces est-elle liée aux changements climatiques?

On peut s'attendre à ce que les changements du climat, particulièrement la hausse des températures, aient une incidence sur le moment où surviennent les phénomènes saisonniers récurrents faisant partie du cycle biologique des organismes (Cleland et coll., 2007). Parmi ces phénomènes, on compte le débourrement et la floraison, l'hibernation et l'émergence des insectes ainsi que la migration et la reproduction des oiseaux (Parmesan, 2006; Morissette et coll., 2009; Forrest et coll., 2010). Les modifications touchant la phénologie peuvent avoir d'importantes répercussions sur la sensibilité au gel, la capacité de reproduction, les relations intraspécifiques et interspécifiques ainsi que sur la répartition des espèces (Morin et coll., 2009; Chuine, 2010). L'aire de répartition de nombreux végétaux des milieux tempérés et boréaux est principalement limitée vers le nord par l'impossibilité pour les fruits de ces espèces d'atteindre la maturité, tandis qu'elle semble être limitée vers le sud par l'incapacité des espèces de fleurir ou de débourrer en l'absence de températures froides nécessaires pour mettre fin à la dormance des bourgeons (Chuine, 2010). Certaines espèces pourraient subir de nouveaux stress abiotiques et biotiques associés aux changements phénologiques, alors que d'autres pourraient tirer avantage de ces changements en agrandissant leur aire de répartition ou en accroissant leur dominance. Les changements phénologiques causés par les changements climatiques peuvent avoir une incidence sur les espèces qui dépendent d'un synchronisme phénologique pour certaines étapes particulières de leur cycle biologique ou qui dépendent d'un asynchronisme, par exemple pour éviter d'être la proie des herbivores (Parmesan, 2007; Singer et Parmesan, 2010).

Quels seront les effets des changements climatiques sur la phénologie des espèces et comment pourrions-nous les mesurer?

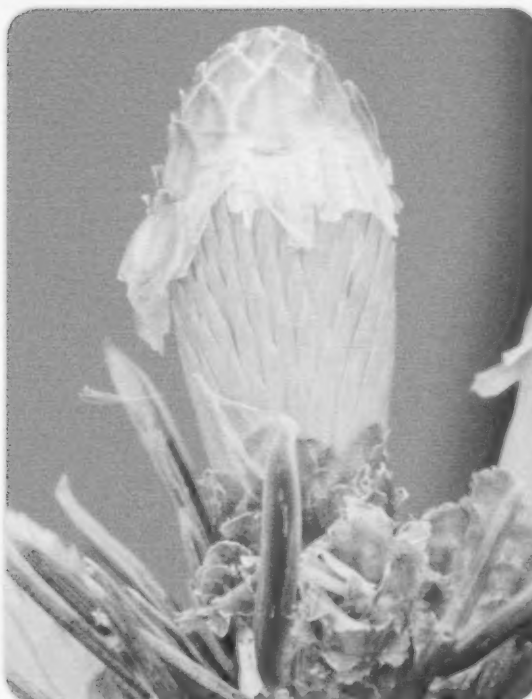
De plus en plus de preuves montrent que le réchauffement climatique entraîne déjà une modification de la chronologie de certaines activités saisonnières (Parmesan et Yohe, 2003). La modification des températures est le principal facteur ayant une incidence sur la phénologie des espèces. Selon



une méta-analyse de la phénologie des végétaux menée en Europe, le mûrissement des fruits de 75 % des espèces sauvages et cultivées étudiées est survenu de plus en plus tôt de 1971 à 2000; ce phénomène a été directement attribué à la hausse des températures (Menzel et coll., 2006). Les changements de température ont une incidence sur les dates auxquelles surviennent les signaux qui déclenchent les phénomènes phénologiques, par exemple la migration saisonnière de certaines espèces d'oiseaux. Ils peuvent aussi entraîner une modification directe de la vitesse de certains processus biochimiques, ce qui a un effet sur la croissance, la reproduction et la dispersion des organismes (Réale et coll., 2003; Cleland et coll., 2007; Jepsen et coll., 2011). Toutefois, bien que la température soit le principal élément déclencheur dans le cas de nombreuses réactions phénologiques, certaines autres réactions sont plutôt dépendantes de la durée du jour (Menzel et coll., 2006) ou encore des précipitations.

Phénologie des arbres

Les changements touchant la phénologie des arbres seront un des premiers signes des effets des changements climatiques sur les écosystèmes forestiers (Cleland et coll., 2007). Les conditions climatiques de l'année en cours et des années précédentes ont une incidence sur la phénologie de la reproduction et des stades du développement (p. ex., de la floraison et de la libération du pollen à la production et au mûrissement des graines, ou du débourrement à la sénescence des feuilles). Chez la plupart des espèces d'arbres nordiques, le débourrement survient au printemps et est déclenché par l'atteinte du seuil de degrés-jours (température de l'air) propres à chaque espèce, de sorte que le réchauffement des températures peut avancer le débourrement printanier d'un certain nombre de jours ou même de semaines. En général, les données climatiques des 100 dernières années et plus indiquent que les saisons de croissance se sont considérablement allongées partout au Canada. Le débourrement, dans le cas de l'érable à sucre (*Acer saccharum*), et la floraison, dans le cas des peupliers, se produisent plus



Deux stades de débournement du bourgeon apical chez l'épinette blanche (*Picea glauca*) : (photo de gauche) stade 4, bourgeon translucide; (photo de droite) stade 5, bourgeon déchiré (Dhont et coll., 2010).

tôt dans l'année qu'auparavant (Johnston et coll., 2009). Dans les forêts tempérées où la saison de croissance est nettement plus longue, on a observé que le déploiement des feuilles (moment du débournement) survenait plus tôt et que la sénescence des feuilles (moment de l'apparition des bourgeons) se produisait plus tard dans l'année (Peñuelas et coll., 2009). Dans le cas de nombreuses espèces, la présence de nuits froides après le début du printemps constitue un facteur très important à considérer. Le froid peut causer des dommages si la croissance débute trop tôt au printemps ou se poursuit trop tard en été ou au début de l'automne (Aitken et coll., 2008). Dans l'est du Canada, des épisodes fréquents de dégel hivernal suivis de gelées printanières tardives ont entraîné un dépérissement de la cime à grande échelle chez le bouleau jaune (Bourque et coll., 2005). Les changements climatiques prévus auront probablement des effets positifs sur la reproduction des arbres nordiques dans une certaine partie de leur aire de répartition, du moins au début; les effets positifs du réchauffement (et des taux élevés de CO_2) pourraient toutefois diminuer à mesure que le réchauffement se poursuit (Johnston et coll., 2009). On sait que la tendance au devancement des phénomènes saisonniers se poursuivra avec le réchauffement du climat au cours des années et des décennies à venir, mais on ignore de quelle façon les espèces réagiront lorsque certains seuils de température seront atteints et si les relations linéaires prévues entre la température et

la saison de croissance se concrétiseront. La reproduction et les phénophases (débournement, floraison, mûrissement des graines, feuillaison, etc.) peuvent servir de facteurs de prédiction des changements potentiels de la répartition des arbres causés par les changements climatiques (Chuine et Beaubien, 2001). La surveillance des phénophases cruciales chez les espèces d'arbres représentatives pourrait nous aider à prédire les effets potentiels des changements climatiques sur les écosystèmes forestiers.

Phénologie des plantes du sous-bois (plantes vasculaires et champignons)

Les indicateurs classiques de la phénologie des végétaux sont la date d'apparition des fleurs et la date d'apparition des feuilles. La date d'apparition de la première feuille est particulièrement importante sur le plan écologique, car c'est souvent le facteur qui varie le plus en fonction des changements de température, et elle s'avère essentielle pour la réalisation d'études d'évaluations précises sur les processus liés au commencement et à la durée de la saison de croissance (Schwartz et coll., 2006). Comme dans le cas des arbres, la tendance générale au réchauffement est associée à un allongement de la saison de croissance et elle entraîne une floraison hâtive chez de nombreuses espèces. Les changements touchant les températures, le froid hivernal, la fonte des neiges et la durée de la saison de croissance ont une incidence sur la croissance, le débournement, la sénescence

des feuilles et l'acclimatation automnale au froid. En raison du réchauffement hivernal, les plantes pourraient commencer à croître à un moment inopportun à la fin de l'hiver ou au début du printemps et risqueraient ainsi d'être endommagées par le froid. Selon l'Agence européenne pour l'environnement (AEE, 2008), on observe partout en Europe une modification du moment où surviennent les phénomènes saisonniers chez les végétaux, principalement en raison des changements climatiques; le déploiement des feuilles et des fleurs a tendance à être devancé dans 78 % des cas étudiés, alors qu'il est retardé de manière significative dans seulement 3 % des cas. La date de la fonte des neiges en hautes altitudes, qui marque le début de la saison de croissance, a eu des répercussions considérables sur certaines espèces herbacées vivaces communes (Inouye, 2008).

Plusieurs espèces du sous-bois, notamment les plantes printanières éphémères, les plantes à petits fruits et les champignons comestibles, sont sensibles aux conditions climatiques et peuvent donc constituer de bons indicateurs des changements phénologiques causés par les changements climatiques (Lapointe, 2001; Flinn et Vellend, 2005; Aubin et coll., 2007). Les plantes printanières éphémères apparaissent au moment du dégel du sol, en même temps que les feuilles des arbres, de sorte qu'elles pourraient être particulièrement sensibles aux changements climatiques. On a observé au Québec que, pour chaque hausse de 1 °C de la température printanière moyenne, la période de floraison était devancée de deux ou trois jours, ce qui constitue une différence significative (Houle, 2007). Selon le programme Opération floraison (Beaubien, 1997; Beaubien et Hamann, 2011), les dates de floraison des principales espèces vivaces d'Alberta sont étroitement liées à la température moyenne des deux mois précédant la floraison; on a observé que le printemps débutait 26 jours plus tôt qu'il y a 100 ans dans cette province (Beaubien et Freeland, 2000). On a établi une corrélation entre l'indice de floraison printanière, créé à partir des données recueillies dans le cadre de l'Opération floraison, et la température à la surface de l'océan Pacifique, notamment durant les épisodes d'El Niño (Sauchyn et Kulshreshtha, 2008).

La température et l'humidité ont une très grande incidence sur la croissance des champignons et le développement de leurs organes de fructification (la croissance augmente avec la hausse de la température et diminue avec la diminution de l'humidité). Les données à long terme sur la période et la fréquence de production des organes de fructification (p. ex., une fois ou deux par année) peuvent être indicatrices des changements climatiques, particulièrement la température. La modification de la phénologie des champignons, qui aurait une incidence sur l'utilisation et le commerce de ces produits, pourrait donc avoir des répercussions économiques. La période de récolte et le rendement des aliments sauvages tels que les champignons et les petits fruits ont sans contredit une

importance socioéconomique (voir la section Dimensions humaines liées aux forêts).

Phénologie animale (oiseaux et autres vertébrés)

Les variations de la température ont une forte incidence sur la phénologie animale. Les changements climatiques peuvent donc avoir des répercussions sur la répartition des animaux et, à long terme, sur leurs taux de reproduction et de mortalité. Dans de nombreuses régions du monde, on a observé, au cours des 30 dernières années, que les phénomènes printaniers du règne animal surviennent de plus en plus tôt (Parmesan et Yohe, 2003; Menzel et coll., 2006; AEE, 2010). Les périodes de migration des oiseaux et de chant des grenouilles sont plus hâtives qu'auparavant, et l'hibernation a subi des changements. Dans certains cas, les changements observés chez une espèce ne coïncident pas avec les changements subis par leurs proies, ce qui entraîne un asynchronisme entre la demande et la disponibilité en nourriture (Visser et coll., 2004; Visser et Both, 2005). En outre, il arrive que les mammifères sortent de leur période d'hibernation ou migrent avant ou après l'émergence ou la fructification des plantes dont ils ont besoin pour se nourrir.

La période de migration printanière des oiseaux est le caractère phénologique des vertébrés pour lequel on possède le plus grand ensemble de données (Visser et coll., 2004; Jonzen, 2007). Bien qu'on dispose de preuves irréfutables du passage et de l'arrivée plus hâtifs des oiseaux au printemps, on comprend encore très peu les mécanismes qui sous-tendent les changements phénotypiques observés. Il est bien connu que les oiseaux réagissent à la durée du jour et aux variables climatiques (température de l'air, précipitations, vents, etc.) et biotiques locales (phénologie des végétaux et des insectes) (Visser et coll., 2010). Ces variables sont des signaux qui sont nécessaires au déclenchement des migrations printanières et automnales et à la période de reproduction. Les fluctuations annuelles atypiques de ces variables peuvent avoir une incidence directe sur la capacité d'adaptation des oiseaux. Toutefois, de nombreux changements touchant l'abondance et la répartition des oiseaux ne sont pas attribuables aux changements climatiques (Kessel et Gibson, 1994). Par exemple, le déclin des populations de certaines espèces de grands migrateurs pourrait être attribuable à la modification de leur habitat (notamment causée par les activités anthropiques, comme la déforestation) dans les aires d'hivernage éloignées. Puisque les amphibiens ne migrent pas, il est probable que la corrélation entre leur état et les phénomènes climatiques locaux soit plus élevée que dans le cas des oiseaux.

Phénologie des insectes

Bien que plusieurs groupes d'insectes (p. ex., les carabes [*Carabidae*]) soient d'importantes composantes de la biodiversité forestière et des fonctions écosystémiques, nous nous intéresserons principalement ici aux ravageurs forestiers.

La température a un effet direct sur le développement, le taux de survie, l'aire de répartition et l'abondance des insectes herbivores. Dans les latitudes nordiques, la température est la principale variable ayant une incidence sur le taux de survie hivernale. La hausse des températures entraîne une augmentation du bilan thermique disponible pour la croissance, la survie et la reproduction (Bale et coll., 2002). Ainsi, le nombre de générations d'une espèce d'insecte qui se succèdent en une année (c.-à-d., le voltinisme) est directement lié à la température. Par exemple, la phénologie de certaines espèces telles que le longicorne noir (*Monochamus scutellatus*), un scolyte commun, varie en fonction de la région (cycle de un à deux ans dans le sud et de deux à trois ans dans le nord). Dans le cas de certains insectes ravageurs, l'augmentation potentielle du voltinisme associée aux changements climatiques entraînerait une hausse de l'intensité des infestations. Le réchauffement pourrait causer une hausse du métabolisme des insectes, une diminution de la période nécessaire à l'éclosion et une accélération du développement des larves,

ce qui pourrait avoir une grande incidence sur la période de vol des insectes. Les modifications touchant la période de vol des insectes pourraient ainsi constituer des indicateurs des changements climatiques et nous aider à détecter ces changements. Ces renseignements sont nécessaires pour évaluer le synchronisme hôte agent pathogène et pourraient notamment nous aider à déterminer les moments propices pour l'application des insecticides. Ce ne sont pas toutes les modifications du climat qui vont entraîner une hausse des dommages causés par les insectes nuisibles. Par exemple, on s'attend à ce que la transition entre les stades juvéniles soit accélérée, ce qui pourrait faire en sorte que les insectes soient de plus petites tailles et qu'il y ait un décalage avec la phénologie de leur hôte (Parmesan, 2006). En outre, en raison de la modification de leur développement, certaines espèces d'insectes pourraient amorcer la période hivernale avec des réserves énergétiques insuffisantes pour survivre à de longues périodes de froid.

Tableau 4. Indicateurs de la phénologie des espèces

ÉLÉMENTS	INDICATEURS ^a	SENSIBILITÉ ^b	FAISABILITÉ ^c	PRINCIPALES CONSIDÉRATIONS
Phénologie des arbres	Débournement (particulièrement chez les angiospermes)	E	M	<p>Les phénomènes phénologiques sont très sensibles aux changements climatiques, et plusieurs indicateurs peuvent être mesurés. Il sera nécessaire de connaître les changements touchant les facteurs climatiques pour évaluer les causes et les effets. Le moment où surviennent ces phénomènes dans une population donnée peut être caractérisé en fonction du début, du point maximal et de la fin du processus.</p> <p>Certains éléments de la phénologie des arbres sont faciles à mesurer et peuvent être relevés par des réseaux de bénévoles; actuellement, les changements phénologiques sont répertoriés par des bénévoles de l'Opération floraison (http://www.naturewatch.ca/francais/plantwatch/) (voir Miller-Rushing et Primack, 2008, pour des renseignements sur le recours aux bénévoles) et du Réseau de surveillance et d'évaluation écologique. Toutefois, il serait essentiel que soit mis sur pied un réseau national sur la phénologie qui s'appuie sur des protocoles détaillés et normalisés. La mesure des facteurs phénologiques pourrait être dirigée ou réalisée par le SCF ou d'autres institutions.</p> <p>Parmi les autres sources d'information, on compte les enquêtes sur le Web destinées au personnel provincial et aux chercheurs bénévoles, les recherches publiées, les registres des vergers à graines provinciaux, les renseignements fournis par les producteurs acéricoles, les prévisions pollen de MétéoMédia ainsi que les images des caméras Web des sites de Fluxnet (aussi connu sous le nom de Programme canadien du carbone; http://fluxnet.ccrp.ec.gc.ca/) et des parcs nationaux.</p> <p>Il est nécessaire de recueillir des données durant plusieurs années pour pouvoir dégager des tendances phénologiques. Il existe une base de données sur la phénologie des arbres, alimentée depuis plusieurs dizaines d'années. En outre, l'échantillonnage doit être effectué à l'échelle des paysages et doit tenir compte des variations des populations du nord au sud.</p> <p>Il existe de nombreux moyens de mesurer les changements phénologiques de manière indirecte, dont par exemple, le recours à des caméras numériques, à la télédétection et au suivi de parcelles permanentes.</p> <p>Il est facile d'obtenir des mesures pour de nombreuses espèces commerciales, grâce aux essais de provenance établis. Les espèces modèles comme l'épinette blanche (<i>Picea glauca</i>) et le peuplier baumier (<i>Populus balsamifera</i>) pourraient faire l'objet d'études plus poussées, car elles sont représentatives des gymnospermes et des angiospermes respectivement. Elles sont présentes dans l'ensemble du Canada et font l'objet de nombreux essais sur le terrain et d'essais de provenance.</p> <p>Les registres et herbiers des sociétés de mycologie peuvent renfermer des renseignements phénologiques sur les plantes vasculaires et les champignons.</p> <p>Juridictions : La plupart des autorités recommandent qu'un suivi de la phénologie des végétaux soit effectué.</p>
	Période des couleurs automnales.	E	E	
	Période de la coulée des érables Voir aussi la section Dimensions humaines liées aux forêts	E	E	
	Date de la libération du pollen	E	M	
	Date de la formation des bourgeons mâles. Date de la formation des bourgeons femelles.	E	M	
	Date de la sénescence des feuilles.	E	M	
	Date du débournement (particulièrement chez les conifères).	E	M	
	Date de la maturation des graines.	E	M	
	Date du début et de la fin de la période de croissance des pousses à croissance indéterminée.	E	F	
	Date de l'émergence de la première feuille.	E	E	
	Date de l'émergence de la première fleur; moment optimal de la floraison.	E	M	
	Arbres et régénération endommagés par le gel. Voir aussi la section Dimensions humaines liées aux forêts.	E	M	
Phénologie des plantes du sous-bois	Début et fin de la saison de croissance.	E	M	
	Date de l'émergence des feuilles des éphémères printanières.	E	F	
	Date de floraison des éphémères printanières.	E	M	
	Date de la floraison optimale.	M	F	
	Date de sénescence des éphémères printanières.	E	M	
	Date de cueillette des bleuets (fruits mûrs). Voir aussi Dimensions humaines liées aux forêts.	E	M	
	Période et caractéristiques (nombre de périodes par année) de la fructification.	M	F	
	Date de la récolte et biomasse des champignons comestibles, relativement à la période de fructification. Voir aussi la section Dimensions humaines liées aux forêts.	M	M	

^a Les indicateurs en caractères ordinaires sont issus des ateliers, les indicateurs en italiques proviennent de la revue de littérature scientifique et Internet, les indicateurs en caractères gras proviennent à la fois des ateliers et de la revue de littérature scientifique et Internet.

^b Sensibilité de l'indicateur aux changements climatiques : élevée (E), moyenne (M) ou faible (F).

^c Faisabilité de la mesure dans le cadre d'un système de suivi régional ou national : élevée (E), moyenne (M) ou faible (F).

(à suivre)

Tableau 4. (suite et fin)

ÉLÉMENTS	INDICATEURS ^a	SENSIBILITÉ ^b	FAISABILITÉ ^c	PRINCIPALES CONSIDÉRATIONS
Phénologie animale	Date de la première observation des oiseaux migrateurs et de leur arrivée sur l'ensemble du paysage (du nord au sud et de l'est à l'ouest).	E	E	<p>Actuellement, les changements touchant la phénologie des animaux sont signalés par des bénévoles (recensement des oiseaux nicheurs et des grenouilles [FrogWatch]) et par certaines institutions (Canards illimités), mais l'étude de ces changements pourrait être dirigée ou réalisée par le Service canadien de la faune ou d'autres institutions. Une grande quantité de données à grande échelle et à long terme sur les populations d'oiseaux peut être tirée de divers programmes et ressources existants ou être fournie par diverses institutions et instances, notamment le Relevé des oiseaux nicheurs (BBS), l'Atlas des oiseaux nicheurs de l'Ontario, les institutions environnementales fédérales (p. ex., le Service canadien de la faune), provinciales, territoriales (p. ex., le ministère des Richesses naturelles de l'Ontario) et municipales, les institutions environnementales fédérales et d'État des États-Unis, les musées d'histoire naturelle, les universités et les collèges, les sociétés et groupes environnementaux, les centres de baguage et de surveillance des oiseaux et les observatoires ainsi que les réseaux électroniques de surveillance des migrations. Des données sur les migrations d'oiseaux sont recueillies depuis plus de 40 ans, à l'avenir, on devrait consigner des données annuelles, mensuelles, hebdomadaires et journalières pour être en mesure de repérer les changements significatifs. Les mesures de la migration des oiseaux devraient être recueillies à l'échelle régionale dans la forêt boréale (en distinguant les parties est et ouest, vu leurs compositions d'espèces et leurs sous-populations différentes).</p> <p>Juridictions Un petit nombre d'autorités font un suivi de la phénologie animale, mais généralement seulement quelques espèces font l'objet d'un suivi (p. ex., périodes d'arrivée et de nidification des oiseaux). En général, les espèces choisies sont celles qui présentent un intérêt pour le public, comme les hirondelles. Dans le cas de la foresterie, le choix des espèces repose sur d'autres critères.</p>
	Période de parade ou de comportement territorial (chant).	E	M	
	Période de construction du nid.	E	M	
	Période de ponte.	E	M	
	Période de l'envol.	E	M	
	Date du départ des oiseaux migrateurs.	E	M	
	Synchronisme des activités des oiseaux avec divers facteurs abiotiques et biotiques (température de l'air, couverture de neige, couverture de glace, température au sol, jours sans gel, bourgeonnement, feuillaison, développement des fruits, des cônes et des graines, dates d'éclosion des œufs d'insectes et d'apparition des insectes adultes, etc.).	E	F	
	Période et caractéristiques de la migration des mammifères.	E	F	
	Date et durée de l'hibernation (date de l'émergence).	E	F	
Phénologie des insectes	Période du chant des grenouilles.	E	M	<p>Les changements climatiques ont une incidence sur la phénologie des insectes.</p> <p>Le SCF fait depuis longtemps le suivi des infestations d'insectes et pourrait en étudier l'évolution dans le temps. En outre, certaines provinces font le suivi de l'aire de répartition des insectes et disposent de données sur la phénologie de ceux-ci.</p> <p>Au Canada, les mesures devraient être recueillies à l'échelle des domaines bioclimatiques.</p> <p>Les indicateurs reposent sur de nombreuses années d'observation. La fréquence des mesures doit être assez élevée pour que la résolution soit adéquate.</p> <p>Juridictions Peu d'autorités font le suivi de la phénologie des insectes, sauf l'arrivée des papillons dans certains cas. Le plus souvent, ce sont les insectes ravageurs et l'étendue de leurs dommages qui font l'objet d'un suivi.</p>
	Période du cycle de vie des insectes ravageurs et voltinisme. Voir aussi la section Infestations d'insectes forestiers.	M	F	
	Période de vol des insectes saproxyliques.	M	F	
	Période de vol des lépidoptères.	E	M	
	Date de l'éclosion des œufs, de l'émergence des larves ou des adultes.	E	F	
	Arrivée des papillons.	E	M	
	Émergence des abeilles.	E	F	

^a Les indicateurs en caractères ordinaires sont issus des ateliers, les indicateurs en italiques proviennent de la revue de littérature scientifique et Internet, les indicateurs en caractères gras proviennent à la fois des ateliers et de la revue de littérature scientifique et Internet.

^b Sensibilité de l'indicateur aux changements climatiques : élevée (E), moyenne (M) ou faible (F).

^c Faisabilité de la mesure dans le cadre d'un système de suivi régional ou national : élevée (E), moyenne (M) ou faible (F).

RÉPARTITION ET ABONDANCE DES ESPÈCES

En quoi consiste la catégorie Répartition et abondance des espèces et comment est-elle structurée?

La présente catégorie traite des effets des changements climatiques sur la répartition biogéographique et l'abondance des espèces végétales (principalement les arbres, mais aussi les plantes herbacées et les champignons) et animales (tableau 5). Les études antérieures portant sur l'effet des changements climatiques sur la répartition des espèces étaient davantage axées sur les espèces animales que sur les végétaux et les champignons (Parmesan, 2006; Lavergne et coll., 2010). Dans le présent document, l'accent sera plutôt mis sur les végétaux, étant donné leur rôle-clé pour le secteur forestier; il sera tout de même question des taxons animaux.

En quoi la répartition et l'abondance des espèces sont-elles liées aux changements climatiques?

Le climat est le principal facteur qui détermine la répartition biogéographique des végétaux et des animaux (Parmesan, 2006; Sexton et coll., 2009; Willis et MacDonald, 2011), et les fossiles montrent qu'il y a eu d'importants changements de répartition en réaction aux changements climatiques passés (Delcourt et Delcourt, 1988; Williams et coll., 2004; Malanson et coll., 2007). Toutefois, les changements climatiques rapides observés ces dernières années excéderont probablement les limites de tolérance naturelles et la capacité de migration de nombreuses espèces (Parmesan, 2006). Par conséquent, les espèces devront s'adapter rapidement ou se déplacer vers des endroits où le climat leur convient, ou alors elles risquent de disparaître (Millar et coll., 2007). Cependant, la répartition des espèces dans le futur sera non seulement déterminée par le climat, mais aussi par de nombreux facteurs indirects agissant en interaction (Corlett, 2011), notamment la modification des régimes de perturbations naturelles et des ressources des milieux, les interventions humaines et d'autres types d'intervention, les taux démographiques des espèces et leurs capacités de dispersion et d'adaptation génétique ainsi que les interactions entre espèces (Thuiller et coll., 2008; Meier et coll., 2012; Zarnetske et coll., 2012).

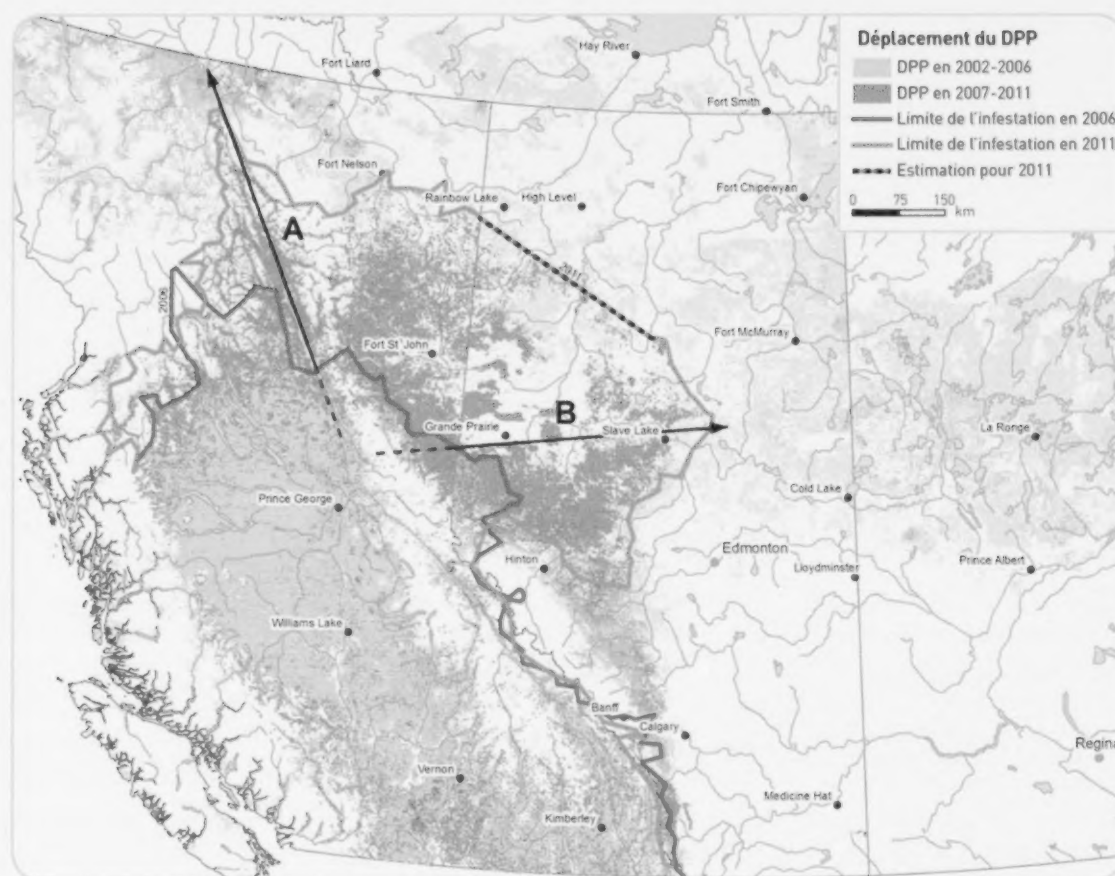
Les changements qui toucheront la répartition et l'abondance des espèces végétales et animales au Canada auront de grandes répercussions sur la société (Lemprière et coll., 2008). Par exemple, le déplacement à venir des aires de répartition des principales essences commerciales aura une incidence sur les activités stratégiques de planification de l'aménagement forestier et l'approvisionnement en bois



à long terme (Steenberg et coll., 2013), sur les fonctions écosystémiques, notamment les conditions du sol (Seastedt et coll., 2004), et même sur la régulation du climat (Bonan, 2008; Shuman et coll., 2011). La modification de la répartition des animaux altérera certains facteurs écologiques-clés comme la pollinisation, la dispersion des semences et la régulation des populations d'organismes nuisibles, en plus d'avoir des répercussions sur l'approvisionnement en aliments et les activités récréatives au niveau local.

Quels seront les effets des changements climatiques sur la répartition et l'abondance des espèces et comment pourrait-on les mesurer?

Au cours des 100 dernières années, on estime que, dans l'hémisphère nord, la limite nord et la limite altitudinale des espèces végétales et animales se sont déplacées en moyenne de 6,1 km vers le nord par décennie et de 6,1 m en altitude par décennie (Parmesan et Yohe, 2003). Toutefois, il est peu probable que la répartition et l'abondance des espèces animales et végétales changent de manière uniforme; elles vont probablement se modifier d'une manière plutôt complexe, en fonction des changements régionaux des variables climatiques, de l'hétérogénéité du paysage, des régimes de perturbations locaux et des interactions entre les espèces (Harrison et coll., 2010; Traill et coll., 2010; Johnstone et coll., 2011). On s'attend à ce que l'aire de répartition de chaque espèce soit modifiée de façon indépendante, ce qui entraînerait la formation de nouveaux assemblages de communautés et de types de forêts dont il n'existe aucun précédent à l'heure actuelle (Williams et coll., 2004; Williams et Jackson, 2007). Les changements touchant les espèces pourront modifier la nature de communautés entières et désynchroniser les interactions entre les espèces d'importance particulière, notamment la phénologie des insectes pollinisateurs et la floraison (Tylianakis et coll., 2008; Burrows et coll., 2011; Zarnetske et coll., 2012).



Déplacement du dendroctone du pin ponderosa (*Dendroctonus ponderosae*) dans l'Ouest canadien, de 2002 à 2011 (Nealis et Cooke, 2014).

Déplacement d'aires de répartition de taxons végétaux

Contrairement à la plupart des espèces animales, les végétaux et les champignons sont principalement des organismes fixes qui ont une capacité limitée à se déplacer en réaction aux changements climatiques. Par conséquent, de nombreuses espèces végétales devront s'adapter sur place aux changements climatiques, par acclimatation ou par adaptation génétique, ou modifier leur aire de répartition, par la dispersion de leurs propagules. En général, on s'attend à ce que le réchauffement climatique cause un déplacement en altitude et vers les pôles (Nord et Sud) d'espèces végétales et de communautés végétales entières, de nombreuses preuves empiriques viennent appuyer cette prédiction. Rousch (2009) a observé que le réchauffement a entraîné, au cours des 100 dernières années, le déplacement de la limite des arbres vers les sommets dans la région centrale des Rocheuses canadiennes. En plus, la limite des arbres s'est déplacée vers le nord dans l'est du Canada (Lescop-Sinclair et Payette, 1995; McManus et coll., 2012). Des tendances similaires ont été observées ailleurs dans le

monde (Soja et coll., 2007). On considère généralement que le froid limite la propagation vers le nord de nombreuses espèces végétales dont, par exemple, l'épinette noire et le sapin baumier (*Abies balsamea*) (Meunier, 2007). On s'attend à ce que le réchauffement rapide en haute altitude accélère le déplacement vers le nord de ces espèces. Cependant, la température n'est pas le seul facteur déterminant la répartition des espèces d'arbres (Malanson et coll., 2007). D'autres facteurs, dont les propriétés du sol et les interactions entre espèces, sont considérés comme des déterminants essentiels de la niche écologique actuelle des espèces. Par exemple, le déplacement vers le nord de la limite des arbres observé dans l'ensemble du Nord canadien et dans certaines parties de l'Alaska a été relativement lent, en partie à cause de la sécheresse du sol. La sécheresse du sol empêche la régénération naturelle des conifères après un feu ou d'autres perturbations. Cette situation soulève des inquiétudes, car un climat plus sec à l'avenir pourrait signifier une perte du couvert forestier le long de la limite sud de la forêt boréale dans l'Ouest canadien (Hogg et Schwarz, 1997). Des données

récentes montrent justement une augmentation du taux de mortalité des arbres dans les Prairies canadiennes, en raison du réchauffement du climat et de récentes périodes de sécheresse (Michaelian et coll., 2011; Peng et coll., 2011).

Au Canada, l'aire de répartition de la plupart des espèces végétales est assez vaste. Ainsi, on doit disposer de données sur la présence et l'absence des espèces ainsi que sur l'abondance à l'échelle des paysages pour être en mesure de détecter le déplacement des aires de répartition des espèces. En outre, il est probable que chaque espèce réagisse différemment aux changements climatiques et doive être surveillée individuellement. Les changements de répartition pourraient être détectables chaque année dans le cas de certaines espèces répandues à courte durée de vie, alors qu'ils pourront seulement être détectés après des dizaines d'années dans le cas d'espèces d'arbres à longue durée de vie. On doit examiner la répartition des végétaux en hautes altitudes et aux limites nord et sud de leurs aires de répartition pour pouvoir détecter leurs déplacements. Dans le cas de nombreuses espèces d'arbres, on dispose de cartes détaillées de l'aire de répartition, de données historiques ainsi que de données d'observation géoréférencées (McKenney et coll., 2007b). Toutefois, les données sur les plantes du sous-bois et les champignons sont moins abondantes. De plus en plus de modèles sont mis au point pour prédire la répartition des espèces dans le futur, en fonction des divers scénarios des changements climatiques; ces modèles sont variés et vont du simple modèle statistique au modèle mécanistique perfectionné (Elith et Leathwick, 2009; Zimmermann, 2010). La méthode de modélisation la plus simple et la plus utilisée est le modèle d'enveloppe climatique, ou modèle de qualité de l'habitat (Elith et Leathwick, 2009; Lavergne et coll., 2010; Araújo et Peterson, 2012), qui prédit la répartition des espèces dans le futur, en fonction des changements prévus des conditions de leur habitat. Hamann et Wang (2006) ont utilisé cette approche pour déterminer de quelle façon la répartition actuelle des arbres en Colombie-Britannique pourrait changer en ce qui a trait à la superficie et à l'altitude et sur le plan spatial. Selon les prédictions, l'habitat potentiel des espèces dont la limite nord de l'aire de répartition se situe actuellement en Colombie-Britannique (Douglas de Menzies [*Pseudotsuga menziesii*], sapin grandissime [*Abies grandis*], thuya géant [*Thuja plicata*], etc.) pourrait s'accroître à un rythme d'au moins 100 km par décennie; certaines essences commerciales de conifères (p. ex., le pin tordu) pourraient perdre de vastes superficies d'habitat, et la plupart des espèces communes de feuillus ne subiraient aucun changement (peuplier baumier, aulne à feuilles minces [*Alnus incana*], etc.). Au moyen d'une approche similaire, Bourque et Hassan (2008) ainsi que Bourque et coll. (2010) ont prédit que, dans les Maritimes du Canada, plusieurs essences communes de la forêt boréale (sapin baumier, bouleau à papier [*Betula papyrifera*], etc.) pourraient perdre des superficies d'habitat à

la limite sud de leur aire de répartition. Inversement, certaines espèces de feuillus des milieux tempérés, comme le chêne rouge (*Quercus rubra*) et l'érable à sucre, étendraient leur aire de répartition vers le nord. Steenberg et coll. (2011) ont fait les mêmes prédictions en utilisant un modèle mécaniste à l'échelle du paysage nommé LANDIS-II.

Néanmoins, de nombreux modèles de répartition des espèces, particulièrement ceux fondés sur l'approche d'enveloppe climatique, comportent des incertitudes importantes en ce qui a trait à la capacité des populations d'espèces de suivre les changements dans la qualité de leur habitat (Lavergne et coll., 2010). En fait, selon plusieurs expériences de modélisation visant à améliorer le réalisme des approximations de la répartition des espèces, de nombreux modèles sous-estiment les contraintes de dispersion des espèces et surestiment nettement la vitesse de migration potentielle (Engler et Guisan, 2009; Meier et coll., 2012). Toutefois, la vitesse de migration naturelle ne constitue pas nécessairement une limitation. En effet, la migration assistée (déplacement actif de génotypes ou d'espèces vers des milieux où les conditions sont favorables en dehors de leur aire de répartition actuelle) est envisagée comme solution de gestion des forêts pour l'adaptation aux changements climatiques (Ste-Marie et coll., 2011). Toutefois, l'utilité et la faisabilité de cette technique font encore l'objet de beaucoup de débats éthiques et scientifiques (Lavergne et coll., 2010; Aubin et coll., 2011; Zarnetske et coll., 2012).

Déplacements d'aires de répartition de taxons animaux d'importance particulière

Les changements aux températures et aux précipitations au niveau régional entraîneront le déplacement de l'aire de répartition de certaines populations animales, particulièrement les espèces spécialisées adaptées à des conditions environnementales particulières (Traill et coll., 2010). Selon une récente méta-analyse des limites des aires de répartition, la limite nord de l'aire de répartition de centaines d'espèces s'est généralement déplacée de façon importante vers le nord (Parmesan et Yohe, 2003). Au Canada, il est généralement admis que l'aire de répartition de la plupart des espèces animales forestières s'étendra vers le nord. Toutefois, comme dans le cas des espèces végétales, il est peu probable que le déplacement des aires de répartition des espèces animales se fasse de manière uniforme dans l'ensemble du pays; ces déplacements seront probablement plutôt complexes (Tylianakis et coll., 2008; Traill et coll., 2010). En outre, contrairement aux espèces végétales, les espèces animales sont généralement mobiles et elles peuvent se déplacer en courant, en nageant, en bondissant ou en volant, ce qui constitue une difficulté particulière pour la détection du déplacement des aires de répartition. Dans le cas de certains taxons précis d'oiseaux, on s'attend à ce que les individus migrent à des latitudes plus nordiques (Berteaux et coll., 2006). En outre, certains taxons qui migraient généralement

vers le sud pourraient devenir résidents. Selon des études de la physiologie des oiseaux chanteurs d'Amérique du Nord, les températures nocturnes hivernales constituent un important facteur déterminant les limites nord des aires de répartition (Root, 1988; Burger, 1998). Au cours des dernières années, certaines espèces d'oiseaux migrateurs ont été observées à des latitudes nordiques où elles n'avaient jamais encore été signalées auparavant, si bien qu'il n'existe aucun nom inuit historique pour ces espèces.

Comme dans le cas des oiseaux, on s'attend à ce que de nombreuses espèces de mammifères se déplacent vers le nord. Par contre, certains mammifères, comme l'ours polaire (*Ursus maritimus*), s'aventurent maintenant beaucoup plus au sud qu'auparavant pour chercher de la nourriture, en raison de la diminution de la banquise arctique, ce qui soulève des préoccupations en matière de sécurité dans les collectivités au sud (Stirling et Derocher, 2012). On prévoit déjà que 87 % des espèces de mammifères de l'hémisphère occidental subiront une diminution de leur aire de répartition, en raison de la disparition des espaces climatiques leur convenant et des contraintes de dispersion associées à la fragmentation anthropique des milieux naturels (Schloss et coll., 2012). Les mammifères sont des organismes importants pour la surveillance des effets écologiques des changements climatiques, en grande partie parce qu'ils sont présents dans la plupart des écosystèmes au Canada, qu'ils ont une grande valeur économique et parce qu'on dispose d'ensembles de données à long terme permettant la description des fluctuations des effectifs de nombreuses populations (Berteaux et coll., 2006; Berteaux

et Stenseth, 2006). D'autres vertébrés, notamment les amphibiens, les reptiles et les poissons, subiront aussi les effets des changements climatiques (Pounds, 2001; Parmesan et Yohe, 2003). La déshydratation des amphibiens causée par la faible couverture de neige hivernale et l'assèchement des milieux humides qui en résulte en été pourrait modifier l'aire de répartition de plusieurs espèces entières (Rodenhouse et coll., 2009). Les reptiles, de leur côté, pourraient être avantagés par la hausse des températures estivales et élargir leur aire de répartition (Kimmel, 2009). De plus, le réchauffement des affluents d'eau froide pourrait entraîner un déplacement des aires de répartition des poissons d'eau froide (p. ex., l'omble chevalier [*Salvelinus alpinus*]) (Catto, 2010).

L'aire de répartition de plusieurs espèces d'insectes forestiers nuisibles est limitée par la température et, dans une moindre mesure, par l'aire de répartition de leurs hôtes (p. ex., le dendroctone du pin ponderosa). Le réchauffement récent a entraîné l'expansion vers le nord de l'aire de répartition de nombreuses espèces, ce qui a une incidence négative sur les ressources forestières qui leur étaient auparavant inaccessibles; en outre, ces espèces peuvent maintenant s'attaquer à de nouveaux hôtes (Coops et Waring, 2011; Régnière et coll., 2012a). Certains insectes vecteurs de maladies se propagent vers le nord (p. ex., la tique à pattes noires, qui peut transmettre la maladie de Lyme aux humains). Le déplacement vers le nord des lépidoptères (papillons) et des odonates (libellules et demoiselles) est confirmé à l'échelle mondiale (Parmesan, 2006).

Tableau 5. Indicateurs de la répartition et de l'abondance des espèces

ÉLÉMENTS	INDICATEURS ^a	SENSIBILITÉ ^b	FAISABILITÉ ^c	PRINCIPALES CONSIDÉRATIONS
Déplacements d'aires de répartition de taxons végétaux	Cartes des aires de répartition des espèces d'arbres.	M	E	<p>La priorité pour la création des cartes des aires de répartition devrait être accordée aux espèces les plus sensibles aux changements climatiques.</p> <p>Dans le cas de nombreuses espèces d'arbres, il existe déjà des cartes d'aire de répartition fiables qui peuvent servir de sources de référence pour la comparaison des tendances historiques et futures.</p> <p>Les données historiques, y compris les photographies aériennes archivées, les images satellites et les placettes d'échantillonnage permanentes, peuvent servir à détecter les tendances passées en matière de répartition des espèces.</p> <p>Il faudra recueillir périodiquement des mesures sur des périodes potentiellement longues (dizaines à centaines d'années) pour pouvoir détecter le déplacement des aires de répartition des espèces.</p> <p>Il existe actuellement des données géoréférencées sur la présence des espèces d'arbres, pour l'ensemble du continent (voir http://planhardiness.gc.ca/) (McKenney et coll., 2007a).</p> <p>La limite des arbres est visible, mesurable et sensible aux changements climatiques; ainsi, elle constitue un fort indicateur potentiel des effets des changements climatiques. Toutefois, il faudra faire le suivi sur de longues périodes pour pouvoir percevoir les changements.</p> <p>Les séries chronologiques d'images satellites et de photographies aériennes seront essentielles pour le suivi des déplacements de la limite des arbres.</p> <p>Les placettes d'échantillonnage permanentes établies le long des écotones pourraient permettre le suivi des modifications de la composition des communautés, y compris celles du programme de placettes terrain de l'IFN.</p> <p>Les entreprises forestières et les gouvernements recueillent des données d'inventaire de peuplements forestiers depuis plus de 50 ans dans de nombreux territoires.</p> <p>Le suivi des plantes herbacées et des champignons ne s'inscrit généralement pas dans les programmes fédéraux ou provinciaux; il est plutôt réalisé dans le cadre de projets de recherche universitaires particuliers (p. ex., Université Acadia, http://botanicalgardens.acadiau.ca) ou par des ONG (p. ex., les centres de données sur la conservation, http://www.accdc.com/home.html) et des clubs de naturalistes ou d'horticulture (particulièrement dans le cas des espèces nouvelles ou peu communes). En combinant les données des réseaux scientifiques citoyens avec celles des programmes scientifiques gouvernementaux, on pourrait obtenir un solide système de surveillance pour la détection des changements dans l'ensemble des paysages forestiers du Canada.</p>
	Cartes des aires de répartition des espèces de plantes herbacées et de champignons (y compris les espèces exotiques envahissantes).	M	F	
	Frontière entre la limite méridionale des arbres et les prairies.	E	E	
	Frontière entre la limite septentrionale des arbres et la toundra.	E	E	
	Limite des arbres en altitude (prairie dans la limite inférieure et zone alpine dans la limite supérieure).	E	M	
	Abondance relative des types de communautés végétales au fil du temps (p. ex., les types de peuplements).	F	E	
	Apparition de nouveaux types de communautés végétales au fil du temps (nouveaux assemblages dans les communautés).	M	F	

^a Les indicateurs en caractères ordinaires sont issus des ateliers, les indicateurs en italiques proviennent de la revue de littérature scientifique et Internet; les indicateurs en caractères gras proviennent à la fois des ateliers et de la revue de littérature scientifique et Internet.

^b Sensibilité de l'indicateur aux changements climatiques : élevée (E), moyenne (M) ou faible (F).

^c Faisabilité de la mesure dans le cadre d'un système de suivi régional ou national : élevée (E), moyenne (M) ou faible (F).

(à suivre)

Tableau 5. (suite et fin)

ÉLÉMENTS	INDICATEURS ^a	SENSIBILITÉ ^b	FAISABILITÉ ^c	PRINCIPALES CONSIDÉRATIONS
Déplacements d'aires de répartition de taxons animaux d'importance particulière	Cartes des aires de répartition des espèces de mammifères d'importance particulière	M	M	<p>- La sensibilité, le caractère mesurable et la pertinence à l'égard des changements climatiques varient grandement d'un animal à l'autre. La priorité pour la création des cartes des aires de répartition devrait être accordée aux espèces les plus sensibles aux changements climatiques. Les grands mammifères seraient peu sensibles aux fluctuations climatiques à court terme, mais dans le cas de certaines populations d'insectes, la réaction aux fluctuations pourrait être très rapide et des déplacements de l'aire de répartition pourraient être observés chaque année (Parmesan, 2006).</p> <p>- Il sera nécessaire de mener de vastes évaluations à l'échelle des paysages pour mesurer les changements des aires de répartition des animaux, car de nombreuses espèces sont largement répandues au Canada. De nombreuses espèces d'oiseaux migrateurs et d'insectes, en particulier, ont une vaste aire de répartition en Amérique du Nord. Ces espèces sont difficiles à détecter, puisqu'elles sont parfois présentes dans certaines régions seulement une partie de l'année ou qu'elles sont présentes seulement à des niveaux endémiques. Les migrations annuelles doivent être prises en compte pour la création des cartes des aires de répartition des espèces animales. Étant donné que la plupart des animaux sont mobiles, qu'ils ont des générations relativement courtes et qu'ils réagissent plus rapidement aux changements environnementaux que les plantes, la limite de leurs aires de répartition devrait être réévaluée tous les 5 à 10 ans, selon le taxon.</p> <p>- Dans le cas de certains taxons animaux, il pourrait être nécessaire d'utiliser des techniques de surveillance particulières pour mesurer le déplacement des aires de répartition. Par exemple, les petits milieux humides saisonniers ou quasi saisonniers, souvent cités comme des milieux sensibles aux changements climatiques, sont des habitats essentiels pour diverses espèces animales, notamment les populations d'amphibiens, qui peuvent être difficiles à recenser, vu leur petite taille et leur présence saisonnière.</p> <p>- Dans le cas des espèces animales d'importance particulière, le déplacement de leur limite nord (limite avant) et sud (limite arrière) de leur aire de répartition devrait être le principal facteur mesuré. Il pourrait être plus facile de faire le suivi de la répartition des mammifères dans les plaines que dans les forêts.</p> <p>- Il existe diverses sources de données d'absence et de présence pour diverses espèces d'oiseaux, provenant notamment de réseaux d'ornithologues amateurs (p. ex., le programme BBS), d'organisations gouvernementales ou d'ONG. Beaucoup de ces données coïncident avec les indices météorologiques (p. ex., la Base nationale de données sur les feux de forêt du Canada), ce qui peut servir à déterminer les facteurs environnementaux accessoires et à établir des liens entre les déplacements des aires de répartition et les changements climatiques. Des relevés aériens annuels visant de nombreux insectes forestiers nuisibles ont été réalisés au Canada au cours des 50 dernières années, avec l'appui des gouvernements provinciaux et fédéral. Toutefois, les relevés aériens sont d'utilité limitée, car ils montrent principalement la présence des infestations et ne permettent pas l'étude des insectes à un niveau endémique.</p> <p>- On peut combiner les relevés aériens aux données existantes provenant des relevés sur le terrain et de la science citoyenne pour créer de solides ensembles de données sur les changements touchant les aires de répartition des espèces sur des périodes allant de 1 à 5 ans (p. ex., la Commission biologique du Canada, http://biologicalsurvey.wordpress.com).</p> <p>- Les réseaux scientifiques citoyens constituent une ressource diversifiée et précieuse pour le suivi de la répartition des espèces animales (p. ex., Attention nature, http://www.naturewatch.ca/francais/).</p>
	Cartes des aires de répartition des espèces d'oiseaux d'importance particulière	M	E	
	Cartes des aires de répartition des espèces de reptiles et d'amphibiens d'importance particulière	M	M	
	Cartes des aires de répartition des espèces de poissons d'importance particulière (espèces d'eaux froides et d'eaux chaudes)	F	F	
	Cartes des aires de répartition des espèces d'insectes d'importance particulière (voir aussi la section Perturbations naturelles pour plus de renseignements sur le suivi des insectes causant des dommages aux forêts)	E	E	
	Abondance relative des types de communautés animales au fil du temps	F	F	
	Nouveaux types de communautés animales au fil du temps (nouveaux assemblages des communautés)	M	F	

^a Les indicateurs en caractères ordinaires sont issus des ateliers, les indicateurs en italiques proviennent de la revue de littérature scientifique et Internet; les indicateurs en caractères gras proviennent à la fois des ateliers et de la revue de littérature scientifique et Internet.

^b Sensibilité de l'indicateur aux changements climatiques : élevée (E), moyenne (M) ou faible (F).

^c Faisabilité de la mesure dans le cadre d'un système de suivi régional ou national : élevée (E), moyenne (M) ou faible (F).

DYNAMIQUE DES PEUPELEMENTS FORESTIERS

En quoi consiste la catégorie Dynamique des peuplements forestiers et comment est-elle structurée?

La présente catégorie traite des effets du climat sur la régénération, la croissance et la mortalité à l'échelle des peuplements forestiers du Canada. D'autres aspects de la dynamique des peuplements, comme les perturbations causées par les insectes et les maladies, sont plutôt abordés dans les sections liées à d'autres indicateurs. La présente catégorie porte sur trois éléments : la régénération, la croissance et la mortalité.

En quoi la dynamique des peuplements forestiers est-elle liée aux changements climatiques?

De nombreux facteurs ont une incidence sur la dynamique des peuplements, notamment les conditions et les processus physiques du site, les régimes de perturbations, ainsi que les interactions biotiques (ravageurs forestiers, compétition entre les arbres pour la lumière, l'eau et les nutriments, etc.). Les changements climatiques ont des répercussions sur tous ces facteurs. Au fil du temps, la dynamique des peuplements modifie la structure et les processus forestiers, notamment la composition en espèces d'arbres, la diversité et l'accumulation de biomasse (Drake et coll., 2011; Taylor et Chen, 2011), ce qui a une incidence sur les cycles de l'eau, du carbone et des nutriments, sur la disponibilité des habitats fauniques et sur les biens et services fournis à la société. Il est essentiel de comprendre le lien entre la dynamique des peuplements et les changements climatiques pour maintenir la valeur écologique et sociale de nos forêts et déterminer la qualité et la quantité des produits forestiers qui peuvent être exploités de façon durable.

Quels seront les effets des changements climatiques sur la dynamique des peuplements forestiers et comment pourrait-on les mesurer?

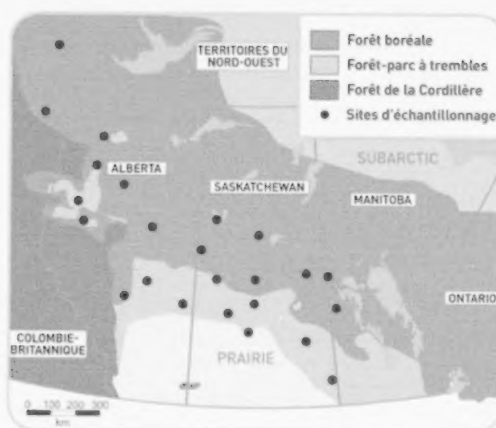
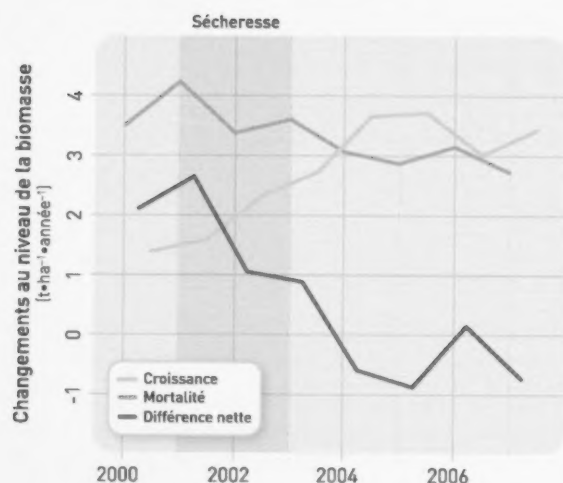
De plus en plus d'éléments indiquent que les changements climatiques ont déjà de profonds effets à grande échelle sur la dynamique des peuplements dans le sud de la forêt boréale canadienne (Peng et coll., 2011; Ma et coll., 2012), dans les forêts de l'ouest des États-Unis (van Mantgem et coll., 2009) et ailleurs dans le monde (Allen et coll., 2010). Pour obtenir un portrait complet des effets des changements climatiques sur la dynamique des peuplements forestiers, il faut intégrer des renseignements d'une grande diversité d'échelles spatiales et temporelles sur la modification des taux de mortalité des arbres, la croissance des arbres et la régénération. Les modèles de simulation sont souvent utilisés pour intégrer

ces renseignements. Par le passé, les effets des variations climatiques étaient rarement intégrés dans les modèles utilisés pour la prévision de la croissance et du rendement des forêts (approvisionnement en fibre de bois) et des cycles du carbone forestier. Toutefois, les modèles récents tentent de tenir compte des effets des changements climatiques. Cette entreprise est toutefois complexe, car la croissance et la productivité des peuplements forestiers dépendent dans une large mesure de multiples facteurs écosystémiques interreliés, dont les changements physiologiques naturels survenant durant le processus de vieillissement des arbres et les changements dans la composition et la diversité des espèces associés à la succession (Binkley, 2004; Drake et coll., 2011; Paquette et Messier, 2011). Il est essentiel de bien distinguer ces facteurs naturels des effets des changements climatiques pour la planification des pratiques et des politiques de gestion adaptative des forêts dans le contexte des changements climatiques.

Régénération

Selon la théorie sur la résilience, les forêts sont les plus vulnérables aux effets des changements climatiques durant le stade de régénération qui suit immédiatement une perturbation causant le remplacement d'un peuplement (Johnstone et coll., 2010). Les facteurs climatiques (température et humidité), et donc les changements climatiques, ont une incidence sur la quantité et la qualité des lits de germination, la production de semences et l'établissement des semis ou des drageons (Jasinski et Payette, 2005; Moss et Hermanutz, 2009). Nous savons que les graves sécheresses peuvent entraîner la mort des semis et des gaules, mais on ne dispose pas d'évaluations quantitatives sur la hausse du taux de mortalité pouvant être causée par les changements climatiques. Dans les régions forestières qui subissent des sécheresses, il est probable que l'établissement de la régénération soit difficile durant les années sèches et qu'on observe une diminution graduelle de la couverture arborescente et une expansion graduelle des prairies ou des arbustaies, particulièrement dans les milieux





Variations annuelles nettes de la biomasse des peupliers faux-trembles (*Populus tremuloides*) (gains associés à la croissance, moins les pertes dues à la mortalité) durant et après de graves périodes de sécheresse dans la région intérieure de l'ouest du Canada (adapté de Hogg et coll., 2008).

xériques et dans les régions au climat sec, comme les provinces des Prairies (Hogg et Schwarz, 1997) et le Yukon (Johnstone et coll., 2010). Certaines espèces de plantes herbacées et d'arbustes qui livrent une forte concurrence aux jeunes arbres pour la lumière, l'humidité et les nutriments durant la phase de régénération (De Grandpré et coll., 2000) pourraient migrer vers le nord avec la hausse des températures et nuire à la régénération dans de nouvelles régions. En outre, la compétition peut également contribuer au passage d'une forêt fermée vers une forêt ouverte après des perturbations (Jasinski et Payette, 2005).

Dans les forêts aménagées, la régénération se limite souvent à la plantation d'arbres; ainsi, les graines et les semis peuvent être déplacés vers les régions qui leur conviennent potentiellement le mieux, de sorte que la régénération n'est pas forcément limitée par la capacité de dispersion et de migration naturelle des espèces. Comme il en a été question dans la section Répartition et abondance des espèces, la migration assistée pourrait être utile, mais elle constitue une technique compliquée dont la mise en œuvre à grande échelle comporte des avantages et des inconvénients. On doit connaître les facteurs de stress liés au gel, à la chaleur et à l'humidité des sites pour sélectionner ceux qui conviennent le mieux à la migration assistée. En outre, il est essentiel de faire la surveillance des résultats pour l'acquisition de connaissances sur cette technique.

Croissance

Les changements climatiques ont une incidence sur les taux de photosynthèse et de respiration des arbres dans les forêts du Canada et, par conséquent, sur la séquestration du carbone, l'accumulation de biomasse et l'approvisionnement en fibre de bois du secteur forestier. Les effets positifs du CO₂ sur le taux de photosynthèse et l'utilisation de l'eau sont

complexifiés par les interactions avec la température, les précipitations et les nutriments. En outre, ces effets diffèrent souvent d'un arbre à l'autre ou d'un peuplement forestier à l'autre et varient en fonction de l'âge des arbres (Körner, 1993). Toutefois, malgré cette complexité, certaines études ont montré que la productivité augmentait en fonction du prolongement des saisons de croissance, de la fertilisation par le CO₂, de la hausse des dépôts d'azote et d'autres facteurs (Boisvenue et Running, 2006; Kirilenko et Sedjo, 2007). Par ailleurs, la productivité des forêts pourrait subir des répercussions négatives dans les régions où les changements climatiques entraînent l'aggravation des sécheresses et la hausse connexe des dommages causés par les insectes et les maladies (Hogg et coll., 2008). De plus, il est important de souligner que les effets des changements climatiques varient grandement d'une espèce et d'un type de milieu à l'autre (Girardin et coll., 2012; Hember et coll., 2012). Par exemple, on a observé que la hausse des concentrations de CO₂ entraînait une hausse de la croissance de diverses espèces de peuplier (*Populus* spp.), mais qu'elle avait un effet nul ou faible sur la croissance du Douglas de Menzies, des trembles et de l'érable à sucre (Johnstone et coll., 2010). Ainsi, les effets diversifiés des changements climatiques sur les espèces pourraient avoir des répercussions sur la composition et la diversité des peuplements dans le futur, en modifiant les relations de compétition entre les espèces ou les relations de certaines espèces d'arbres avec d'autres organismes (p. ex., le mutualisme avec les mycorhizes) (Clark et St. Clair, 2011; Thorpe et coll., 2011). En outre, les effets des changements climatiques sur la croissance varient en fonction des caractéristiques du milieu. Selon Chen et coll. (2002), les peuplements des milieux productifs atteignent une productivité primaire nette maximale plus élevée et en moins de temps que les peuplements des milieux moins productifs,

mais connaissent un déclin plus rapide par la suite. Ces auteurs laissent aussi entendre qu'on peut considérablement réduire les incertitudes associées aux estimations de la productivité primaire nette dans le contexte des changements climatiques en quantifiant avec exactitude le renouvellement des racelles et la litière tombée. La diversité des réactions phénologiques à la température et au CO_2 montre à quel point il est complexe de modéliser la croissance et la productivité primaire nette en fonction des changements climatiques et souligne l'importance de recueillir des données empiriques sur les réactions réelles.

Mortalité

On étudie souvent les effets du CO_2 et de la température sur la croissance indépendamment des effets de la diminution des précipitations ou de la sécheresse. La sécheresse peut annuler les effets positifs du CO_2 et de la température en causant un stress aux arbres, ce qui les rend plus vulnérables aux insectes et aux agents pathogènes. Le climat a aussi une incidence sur la mortalité associée aux interactions entre les facteurs de stress abiotiques (principalement la sécheresse et le feu) et biotiques (insectes et agents pathogènes), mais il est facile de confondre ces interactions avec d'autres facteurs. Vu l'abondance et la complexité de telles interactions, on peut sérieusement douter de notre capacité à prédire les conditions menant à la mortalité seulement au moyen de la modélisation. Ainsi, on peut en conclure qu'il est essentiel d'avoir recours à une approche intégrée de modélisation et de suivi qui englobe des échelles spatiales allant du peuplement et de l'unité d'aménagement à l'écorégion et au pays en entier. La modélisation et les activités de suivi utilisées séparément ne

constituent pas des techniques adéquates pour l'étude des questions importantes liées aux changements climatiques qui sont complexes sur le plan de la biophysique et qui demandent un travail à long terme.

Des augmentations à grande échelle du dépérissement et de la mortalité dans les forêts, souvent facilement observables par vue aérienne (Michaelian et coll., 2011), ont été signalées après les récentes sécheresses et autres phénomènes climatiques (Allen et coll., 2010). Lorsque de tels cas de mortalité sont récurrents et causent la formation de parcelles d'arbres morts, on peut considérer qu'ils font partie du régime de perturbations (voir la section Perturbations naturelles). Toutefois, il arrive souvent que les effets des changements climatiques soient subtils et se traduisent par une hausse graduelle à long terme du taux de mortalité des arbres sur de vastes superficies (Hogg et coll., 2008; van Mantgem et coll., 2009; Peng et coll., 2011). La mort des arbres est souvent attribuable à des causes multiples et se produit de manière épisodique et sporadique, ce qui rend complexes le suivi des cas de mortalité et l'identification de leurs causes (Morelli et Carr, 2011). Les semis sont généralement plus sensibles à la sécheresse et aux températures élevées que les arbres âgés; ainsi, comme nous l'avons mentionné précédemment, le taux de régénération constitue un indicateur précoce du stress lié au climat. Les arbres matures bien établis peuvent survivre dans des conditions climatiques qui ne conviennent pas à l'établissement des semis. Ce phénomène peut nous faire croire à tort, à court terme, que les changements climatiques n'ont aucun effet sur les forêts.

Tableau 6. Indicateurs de la dynamique des peuplements

ÉLÉMENTS	INDICATEURS ^a	SENSIBILITÉ ^b	FAISABILITÉ ^c	PRINCIPALES CONSIDÉRATIONS
Régénération	Réussite ou échec de la régénération naturelle des forêts après une récolte ou des perturbations.	M	M	<p>La régénération est sensible aux changements climatiques et elle est aussi très importante pour la productivité future des forêts. Il est relativement simple d'évaluer si la régénération est une réussite ou un échec. Ces mesures devraient être complétées par le suivi de l'évolution des plantations, à partir du moment de leur établissement. Il se peut que les plantations ne soient pas les plus performantes après 10 ou 20 ans.</p> <p>Les données relatives à la réussite ou à l'échec de la régénération devraient être recueillies par unité de gestion et stratifiées selon l'altitude, l'orientation, l'unité écologique et l'espèce. Les gouvernements provinciaux et les entreprises possèdent des données. On pourrait utiliser la technique de détection et télémétrie par ondes lumineuses (LiDAR, télédétection) ou les techniques de SGM dérivées (Semi-Global Matching, ou appariement quasi global).</p> <p>Les causes des échecs de régénération devraient être consignées, dans la mesure du possible.</p> <p>On pourrait regrouper les renseignements recueillis dans le cadre des essais de migration assistée (si les provinces font la surveillance des résultats).</p> <p>Il est simple de suivre les changements apportés à la période de plantation, dans la mesure où les entreprises consignent et fournissent les données sur la date de la plantation et les raisons justifiant la modification du calendrier.</p> <p>Il faudrait établir des placettes d'échantillonnage pour évaluer la régénération par voie végétative dans la forêt boréale, si cet indicateur présente un intérêt particulier, car il est probable qu'aucune institution ou aucun groupe ne l'a encore étudié.</p> <p>Juridictions : La régénération pourrait devenir problématique selon plusieurs autorités, mais celles-ci ne font pas toutes le suivi de la régénération, et il n'existe pas de protocole normalisé pour la collecte des données.</p>
	Réussite ou échec des parcelles de migration assistée (taux d'établissement).	M	M	
	Production de cônes et de graines par les arbres.	M	M	
	Régénération après une perturbation.	M	M	
	Densité et répartition des arbustes et plantes herbacées qui sont en concurrence et qui limitent la régénération et la croissance des arbres. Voir aussi la section Déplacements d'aires de répartition de taxons animaux d'importance particulière.	M	F	
	Modification de la fréquence et de l'abondance de la régénération par voie sexuée dans les forêts boréales et subarctiques.	E	F	
	<i>Calendrier de plantation.</i>	M	M	

^a Les indicateurs en caractères ordinaires sont issus des ateliers, les indicateurs en italiques proviennent de la revue de littérature scientifique et Internet; les indicateurs en caractères gras proviennent à la fois des ateliers et de la revue de littérature scientifique et Internet.

^b Sensibilité de l'indicateur aux changements climatiques : élevée (E), moyenne (M) ou faible (F).

^c Faisabilité de la mesure dans le cadre d'un système de suivi régional ou national : élevée (E), moyenne (M) ou faible (F).

(à suivre)

Tableau 6. (suite et fin)

ÉLÉMENTS	INDICATEURS ^a	SENSIBILITÉ ^b	FAISABILITÉ ^c	PRINCIPALES CONSIDÉRATIONS
Croissance	Croissance des arbres (hauteur, diamètre à hauteur de poitrine et volume).	M	E	<p>La croissance, la productivité et le taux de mortalité sont sensibles aux changements climatiques et sont des facteurs d'intérêt primordial pour l'industrie forestière et l'économie du Canada. La croissance a une incidence sur la séquestration du CO₂, de sorte qu'elle constitue une importante variable pour la production de rapports nationaux à l'appui des accords internationaux sur les changements climatiques.</p> <p>Pour étudier la question, il faudra s'appuyer sur une approche intégrée multiéchelle qui englobe le suivi des changements subis par les arbres, des mesures prises dans les placettes au sol, des inventaires forestiers et la télédétection (p. ex., LIDAR ou autres techniques de télédétection).</p> <p>Les placettes d'échantillonnage permanentes sont les meilleurs outils pour la collecte de données sur la croissance des arbres. Les placettes de l'inventaire forestier national du Canada ont un potentiel similaire à celui de la US Forest Inventory and Analysis Database. Ils nous permettent de faire le suivi du taux de mortalité, de la régénération, de la croissance et du volume.</p> <p>Il est possible d'évaluer les changements touchant la production primaire brute des forêts au moyen d'observations de l'intensité de la photosynthèse par satellite et de la modélisation de l'efficacité d'utilisation de la lumière, combinées à des mesures recueillies à partir de tours.</p> <p>Les changements attribuables au climat qui touchent la productivité des arbres à l'échelle du peuplement peuvent être mesurés au moyen de réseaux de placettes au sol et d'études des anneaux de croissance des arbres, combinés à des équations allométriques de la biomasse.</p> <p>Les changements observés dans la fréquence de certains caractères particuliers des anneaux de croissance des arbres peuvent servir à l'évaluation des variations à long terme des phénomènes météorologiques extrêmes (Girardin et coll., 2009; Hoffer et Tardif, 2009; Tardif et coll., 2011) et des cas de défoliation causés par les insectes (Hogg et coll., 2002b).</p> <p>Les changements observables dans l'architecture du houppier des arbres en réaction aux phénomènes climatiques tels que la sécheresse constituent un facteur potentiellement important qui a des effets à plus long terme sur la croissance de la forêt, en modifiant la capacité de captage de la lumière du couvert forestier (Girard et coll., 2011a; Girard et coll., 2011b).</p> <p>Le climat peut avoir une incidence sur les concentrations de nutriments du feuillage et, par conséquent, sur le taux de photosynthèse des arbres (particulièrement dans le cas de l'azote).</p> <p>Comme les arbres, les plantes du sous-bois sont sensibles aux changements climatiques.</p> <p>Il sera difficile d'établir des liens entre les changements touchant la croissance des plantes du sous-bois et le climat, car les changements touchant l'étage supérieur peuvent fausser les résultats et complexifier l'analyse. En effet, il sera complexe de distinguer les changements attribuables au climat des changements attribuables aux tendances normales en matière de succession, au broutage, etc.</p> <p>Il sera plus simple de déterminer l'effet du climat sur les prairies que sur les plantes du sous-bois, mais l'utilisation des terres et le pâturage engendreront de la confusion.</p> <p>Juridictions : Presque toutes les autorités ont indiqué mesurer d'une certaine façon la productivité des forêts. Toutefois, souvent, les facteurs mesurés étaient seulement les superficies de forêts et le boisement. Les statistiques sur la croissance, la productivité et le taux de mortalité des arbres étaient moins courantes. Peu d'instances ont fourni des données sur la croissance des plantes du sous-bois, des arbustes et des plantes herbacées. Toutefois, les écotones entre les forêts et les arbustais ou les prairies ont été étudiés, et la progression de ces trois milieux a été enregistrée.</p>
	Productivité primaire nette des forêts.	M	M	
	Production primaire brute des forêts.	M	M	
	Productivité aérienne des arbres à l'échelle du peuplement.	M	E	
	Volume total de bois et volume de bois commercial produit dans les plantations et les parcelles d'essais de provenance.	M	E	
	Caractères distinctifs des anneaux de croissance.	M	M	
	Architecture du houppier.	M	F	
	Teneurs en nutriments du feuillage des arbres. Voir aussi la section Conditions et processus édaphiques.	M	F	
	Couverture des plantes du sous-bois, au fil du temps (pour certaines espèces d'arbustes et de plantes herbacées).	M	F	
Mortalité	Densité et répartition des arbustes et plantes herbacées compétitives qui limitent la régénération et la croissance des arbres. Voir aussi la section Déplacements d'aires de répartition de taxons végétaux.	M	F	
	Mortalité des arbres (pourcentage de tiges mourant chaque année).	M	M	<p>Le taux de mortalité des arbres est régulièrement mesuré dans les placettes d'échantillonnage permanentes et dans le cadre d'autres études de surveillance à long terme.</p> <p>Il peut être difficile de déterminer le rôle des changements climatiques dans la mortalité des arbres.</p> <p>Les changements dans les taux de mortalité et l'accumulation de la biomasse sont causés par le climat à l'échelle du peuplement et peuvent être évalués au moyen de mesures des arbres dans les placettes et d'équations allométriques de la biomasse, combinées à des analyses des facteurs climatiques et à l'historique des perturbations.</p> <p>Les relevés aériens et la télédétection peuvent être utilisés pour cartographier l'étendue des épisodes de dépérissement et de mortalité, dans les cas où la sévérité est supérieure au seuil de détection (généralement une mortalité de 20 %).</p> <p>Les données des gouvernements provinciaux et de l'industrie peuvent aussi fournir des renseignements sur les taux de mortalité des semis et des gaules.</p>
	Dépérissement des arbres (pourcentage d'arbres vivants dont le houppier présente des branches mortes).	M	M	
	Perte de biomasse associée à la mort des arbres dans les peuplements.	M	M	
	Taux de mortalité des semis et des gaules dans les peuplements en régénération et les peuplements aménagés. Voir aussi la section Perturbations naturelles.	M	M	

^a Les indicateurs en caractères ordinaires sont issus des ateliers, les indicateurs en italiques proviennent de la revue de littérature scientifique et Internet; les indicateurs en caractères gras proviennent à la fois des ateliers et de la revue de littérature scientifique et Internet.

^b Sensibilité de l'indicateur aux changements climatiques : élevée (E), moyenne (M) ou faible (F).

^c Faisabilité de la mesure dans le cadre d'un système de suivi régional ou national : élevée (E), moyenne (M) ou faible (F).

CONDITIONS ET PROCESSUS ÉDAPHIQUES

En quoi consiste la catégorie Conditions et processus édaphiques et comment est-elle structurée?

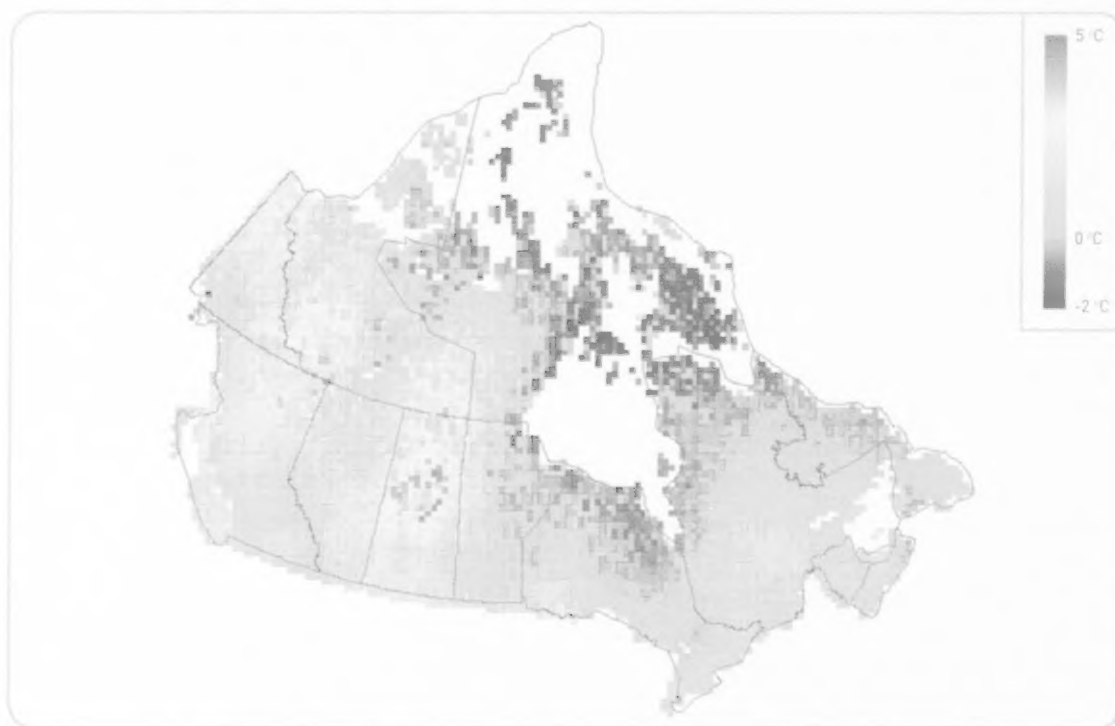
Les conditions et processus édaphiques englobent la structure et les fonctions biotiques et abiotiques du sol. Le sol est un assemblage de matières géologiques, de matière organique décomposée, de racines vivantes, d'animaux, de microorganismes et d'eau qui a sa propre atmosphère. La nature d'un sol dépend de son matériau parental, de sa position topographique, du climat, de la végétation et des autres organismes vivants qu'il supporte ainsi que des conditions de sa formation (Kimmins, 2003). La présente catégorie comporte trois éléments principaux : la température et l'humidité du sol, les composantes biologiques des sols et la production et la décomposition de la matière organique (tableau 7).

En quoi les conditions et les processus édaphiques sont-ils liés aux changements climatiques?

Les changements climatiques auront probablement une incidence sur les processus biologiques, physiques et chimiques du sol (Paul, 2007). Le sol fournit les conditions physiques et chimiques nécessaires à la vie des végétaux et, par conséquent, à la vie de la plupart des animaux et microorganismes (Trumbore,



2000). Le sol est un facteur déterminant du potentiel de production des forêts. Les propriétés du sol déterminent le devenir de l'eau dans le système hydrologique (Brady et Weil, 1999), et l'évapotranspiration des forêts joue un rôle important dans la régulation des bilans hydriques et énergétiques des écosystèmes (Govind et coll., 2011). La modification de la concentration du sol en C associée aux changements climatiques peut avoir des effets considérables sur le bilan du C mondial (Trumbore et coll., 1996). En effet, le stock de C du sol est deux fois aussi élevé que celui de l'atmosphère et trois fois



Simulation de la variation de la température annuelle moyenne, dans les 20 premiers centimètres du sol, au cours du 21^e siècle (adapté de Zhang et coll., 2005).

aussi élevés que celui de la végétation (GIEC, 2001). Ainsi, un changement même minime du flux sortant de CO_2 du sol (respiration) pourrait entraîner des émissions atmosphériques supérieures aux émissions annuelles associées aux changements de l'utilisation des terres ou à la combustion des combustibles fossiles (Rustad et coll., 2000). En outre, en plus de réagir aux changements climatiques, les sols pourraient jouer un rôle important dans l'atténuation de ces changements (Lal, 2004).

Quels seront les effets des changements climatiques sur les conditions et les processus édaphiques et comment pourrait-on les mesurer?

Les changements au niveau des températures et des précipitations auront une incidence sur l'activité des racines et des organismes du sol, le taux de décomposition, ainsi que le prélèvement des nutriments et de l'eau par les végétaux. Bien qu'on dispose d'une robuste littérature scientifique sur l'effet des changements climatiques sur chacune des conditions et chacun des processus édaphiques, il est difficile de déterminer lequel sera le plus durement touché par le réchauffement et les changements touchant les régimes de précipitations. Par exemple, la hausse des températures entraînera une hausse de la respiration du sol (Peterjohn et coll., 1993; McHale et coll., 1998), qui constitue la plus importante source de CO_2 des écosystèmes terrestres. En outre, la hausse de la respiration du sol sera probablement associée à une hausse de l'activité microbienne et de la minéralisation des nutriments dans le sol. Cette minéralisation accrue entraînera une augmentation de la quantité de nutriments disponibles, ce qui pourrait améliorer le taux de croissance des plantes et, par conséquent, causer une augmentation de la séquestration du C (Melillo et coll., 1993). Ainsi, les changements climatiques futurs pourraient avoir divers effets sur le C du sol, allant de pertes minimales à des gains modérés, et ces effets varieront probablement d'une région à l'autre (Arnell et coll., 2012; Gottschalk et coll., 2012).

Température et humidité du sol

Les hausses prévues des températures auront une incidence sur la température du sol, qui est en partie déterminée par les conditions météorologiques (Zhang et coll., 2005). Comme dans le cas des régimes de précipitations, l'augmentation prévue des sécheresses graves et des inondations aura probablement des répercussions sur les régimes régionaux d'humidité du sol. En outre, la température du sol a une incidence sur l'évaporation et le séchage du sol. La température et l'humidité du sol ont des effets importants sur une vaste gamme de processus édaphiques et végétaux, comme la respiration du sol, le taux de décomposition et d'autres transformations microbiennes (Bonan et Van Cleve, 1991; MacDonald et coll., 1995).

Composantes biologiques du sol

Selon les projections actuelles, la hausse de la température du sol aura probablement des répercussions sur la croissance

des racines, directement par ses effets sur l'activité physiologique des plantes et indirectement par ses effets sur les interactions microbiennes du sol et par la hausse probable de la minéralisation (Rustad et coll., 2001) et de la disponibilité en nutriments (Trumbore, 2000). En effet, la température et l'humidité du sol ont une grande incidence sur les communautés microbiennes (Davidson et coll., 2006). Rustad et coll. (2001) ont noté, dans le cadre de 32 études, une hausse moyenne de la température du sol de 2,4 °C, ce qui a entraîné une augmentation moyenne de la respiration du sol de 20 % et du taux net de minéralisation du N de 46 %. La hausse de la croissance racinaire pourrait accentuer le cycle des nutriments et faire augmenter les taux de respiration des racines et des microorganismes (Schlessinger et Andrews, 2000). La hausse des températures pourrait accentuer le renouvellement du N du sol et ainsi augmenter la disponibilité en N, ce qui pourrait entraîner une augmentation de la séquestration de C (Melillo et coll., 1993). Selon Sullivan et coll. (2008), les régions où on observe une augmentation considérable de la productivité primaire nette peuvent constituer d'importants puits de C, malgré une hausse de la respiration du sol. En outre, la température, les précipitations et l'enrichissement en CO_2 peuvent avoir une incidence directe sur les organismes du sol. Par exemple, le réchauffement et la hausse des précipitations peuvent directement stimuler l'activité microbienne du sol (Fierer et Schimel, 2002). Blankinship et coll. (2011) ont montré que les organismes du sol étaient peu abondants en conditions froides et de sécheresse. Il est largement reconnu que la disponibilité de l'eau a une incidence considérable sur l'activité microbienne du sol (Paul et Clark, 1996), mais peu d'études ont porté sur les effets directs de la modification des régimes de précipitations sur les processus du sol (Emmett et coll., 2004). La température du sol a une incidence sur l'évaporation et donc sur le séchage du sol, de sorte que, dans le cadre de la plupart des études, l'humidité du sol est avancée comme explication de l'absence de réaction des processus du sol à la hausse des températures (Peterjohn et coll., 1994; Robinson et coll., 1995). Selon Smith et coll. (2005), malgré de fortes hausses des températures, les conditions de sécheresse pourraient ralentir la décomposition de la matière organique du sol. De plus, les périodes prolongées d'engorgement du sol peuvent créer des conditions anaérobies et ainsi modifier la chimie et l'activité biologique du sol, particulièrement en conditions chaudes (Kozłowski, 1986).

Production et décomposition de la matière organique

Dans le sol, la décomposition dépend grandement des communautés microbiennes (Göttlicher et coll., 2006; Monson et coll., 2006). Comme nous l'avons mentionné précédemment, la température du sol des forêts constitue un facteur déterminant pour les processus microbiens. Selon McHale et coll. (1998), la décomposition de la litière s'accélère avec la hausse de la température du sol (températures de 2,5 à 7,5 °C dans les 5 premiers centimètres du sol). En outre, la croissance racinaire accrue associée à la hausse des taux

de minéralisation entraîne une augmentation de la quantité de C souterrain, ce qui peut favoriser l'accélération de la décomposition (Schlessinger et Andrews, 2000). L'accélération de la décomposition est associée à un renouvellement accru du C dans le sol, ce qui entraînerait une diminution de la quantité de C emmagasiné sous forme de matière

organique. Cependant, les conditions sèches peuvent ralentir la décomposition. Par exemple, dans certaines régions d'Europe où un assèchement est prévu dans le futur, on s'attend à ce que le processus de décomposition diminue, malgré la hausse de la température du sol (Smith et coll., 2005).

Tableau 7. Indicateurs des conditions et processus édaphiques

ÉLÉMENTS	INDICATEURS ^a	SENSIBILITÉ ^b	FAISABILITÉ ^c	PRINCIPALES CONSIDÉRATIONS
Température et humidité du sol	Température du sol.	E	M	<p>Les changements climatiques auront des effets sur les sols, mais il sera difficile de cerner ces effets.</p> <p>Il est difficile d'examiner les causes des changements touchant les sols. En outre, la variabilité spatiale des sols peut être considérable. Ainsi, il faudrait prélever des échantillons dans divers types de forêts situés dans des régions climatiques et des conditions édaphiques différentes, puis planifier des répétitions appropriées sur le plan statistique. Utiliser des études à l'échelle de parcelles stratifiées selon les régions d'intérêt, puis transposer les résultats à l'échelle d'un paysage ou d'une région.</p> <p>La température du sol pourrait être mesurée à différentes profondeurs le long des toposéquences. Les données ainsi recueillies pourraient être comparées à celles des sites de Fluxnet et d'ECOLEAP (<i>Extended Collaboration to Link Ecophysiology and Forest Productivity</i>).</p> <p>L'humidité du sol dans la zone d'enracinement des arbres (généralement jusqu'à 1 ou 2 m de profondeur) constitue un indicateur important des effets de la sécheresse sur les forêts, mais on dispose d'ensembles de données pluriannuelles seulement pour quelques sites (p. ex., sites des tours de Fluxnet Canada) (Bernier et coll., 2006; Zha et coll., 2010). Voir aussi les modèles d'humidité du sol (tableau 1).</p> <p>La production de litière pourrait être mesurée dans le cadre du Réseau national des transects latitudinaux, du programme <i>Climate Information for Public Health Action</i> et d'autres programmes de recherche. En outre, on pourrait utiliser le matériel et les méthodes normalisées de l'Expérience canadienne sur la décomposition interstationnelle.</p> <p>La télédétection (p. ex., radar à synthèse d'ouverture) ne permet pas encore de surveiller les principaux attributs édaphiques, mais elle constitue une technique pratique et prometteuse.</p> <p>Juridictions : Peu d'autorités (voir l'annexe 1) ont mentionné des indicateurs liés aux sols, mais des préoccupations quant à l'érosion ont été soulevées. Quelques instances font la surveillance de certains cycles biochimiques, et l'état du sol est parfois mentionné comme source de préoccupation. En Europe, l'Agence européenne pour l'environnement a souligné que la surveillance des sols est déficiente et suggère d'ajouter aux indicateurs l'érosion du sol, la capacité de rétention d'eau du sol et la concentration du sol en C organique. La Chine étudie le rôle des sols dans le cycle du CO₂. Certaines instances mentionnent le stockage du carbone comme source de préoccupation. Aucune instance n'a fait le suivi des changements touchant les concentrations en nutriments, la température et la capacité de rétention d'eau. Aucune instance n'a utilisé les mycorhizes comme indicateur de l'état du sol. Aucun des pays n'a indiqué dans ses rapports la méthode utilisée pour faire le suivi des conditions du sol.</p>
	Potentiel redox du sol.	M	F	
	Humidité du sol.	E	M	
	Réservoir de C du sol.	M	F	
Composantes biologiques du sol	Respiration du sol.	E	F	
	Biomasse des organismes du sol.	M	F	
	Abondance des organismes du sol.	M	F	
	Rapports entre différents organismes du sol (p. ex., champignons/bactéries), nutriments microbiens (p. ex., C microbien/N microbien), nutriments microbiens et nutriments totaux (p. ex., C microbien/C total), etc.	M	F	
	Taux d'activité microbienne du sol.	M	F	
	Densité des populations microbiennes du sol.	F	F	
	Nutriments du sol.	M	M	
	Taux de minéralisation du N.	M	F	
Production et décomposition de la matière organique	Taux annuel de décomposition de la litière.	M	M	
	Taux annuel de production de litière.	F	M	

^a Les indicateurs en caractères ordinaires sont issus des ateliers; les indicateurs en italiques proviennent de la revue de littérature scientifique et Internet; les indicateurs en caractères gras proviennent à la fois des ateliers et de la revue de littérature scientifique et Internet.

^b Sensibilité de l'indicateur aux changements climatiques : élevée (E), moyenne (M) ou faible (F).

^c Faisabilité de la mesure dans le cadre d'un système de suivi régional ou national : élevée (E), moyenne (M) ou faible (F).

SYSTÈME HUMAIN



DIMENSIONS HUMAINES LIÉES AUX FORÊTS

En quoi consiste la catégorie Dimensions humaines liées aux forêts et comment est-elle structurée?

Les dimensions humaines concernent les liens qu'entretiennent les systèmes sociaux avec le milieu forestier et leurs incidences sur ce milieu. Les systèmes sociaux incluent les individus, les familles, les entreprises, les collectivités, les groupes, les organisations, les institutions et les sociétés. Quant aux relations unissant les systèmes sociaux et les forêts, elles sont considérées tant dans une perspective d'utilisation que de non-utilisation, en reconnaissant qu'elles sont façonnées par plusieurs forces d'ordre économique, sociologique, spirituel, éthique, psychologique, politique et culturel. Les environnements forestiers, qui sont répartis entre différents régimes de propriétés et d'aménagement forestier, marquent aussi bien les paysages urbains que ceux qui sont à l'interface entre les milieux urbains et ruraux, ou encore ceux des milieux ruraux et des régions éloignées. Le système humain se divise en huit éléments ayant trait aux effets des changements climatiques sur ce système et à sa capacité d'adaptation : capital naturel, utilisations des forêts, infrastructures, économie, capital social, démographie, santé humaine ainsi qu'institutions et gouvernance. Certains éléments humains sont liés aux effets des changements climatiques, alors que d'autres concernent plutôt les composantes-clés de la capacité d'adaptation de la société. Par exemple, les transformations provoquées par les changements climatiques pourraient affecter l'économie de certaines régions, forçant ainsi la société à s'adapter aux changements climatiques. Étant donné les récentes avancées des travaux sur les effets potentiels des changements climatiques sur les systèmes humains, nous soulignons ci-dessous l'importance de considérer les éléments ayant une incidence sur la capacité des systèmes humains à s'adapter aux changements, de même que les facteurs liés à la volonté d'agir. En outre, dans le tableau des indicateurs (tableau 8), nous précisons si les indicateurs présentés sont liés aux impacts des changements climatiques ou à la capacité d'adaptation. La sensibilité et la faisabilité n'ont pas été évaluées dans le cas des indicateurs liés aux éléments humains.

En quoi les dimensions humaines sont-elles liées aux changements climatiques?

Certains des effets les plus frappants des changements climatiques dans les milieux forestiers sont liés aux changements des régimes de perturbations naturelles qui toucheront ou qui modifieront probablement des caractéristiques des forêts qui sont essentielles pour certains types d'utilisations. Les effets des changements climatiques, notamment la hausse des inondations, des feux de forêt et des infestations d'insectes



ainsi que la modification des conditions météorologiques saisonnières, pourraient remettre en cause l'existence et complexifier l'entretien des infrastructures en milieux forestiers ou nécessiter de nouvelles infrastructures. Les changements climatiques (comme ceux ayant une incidence sur les perturbations forestières) (Flint et coll., 2009) pourraient nuire aux systèmes social, politique et économique des personnes qui vivent, travaillent ou pratiquent des activités récréatives dans les milieux forestiers. Étant donné la nature multidimensionnelle de la dépendance à l'égard des forêts (Beckley, 1998), les changements climatiques risquent d'avoir des répercussions sur la manière dont la société (les individus, les ménages, les collectivités, les régions et les provinces) utilise la forêt (le bois, les services forestiers, le tourisme et les loisirs, les produits non ligneux, les services écologiques, etc.). Les collectivités tributaires des forêts sont parmi les plus vulnérables aux changements climatiques, en raison de leur emplacement et de leur forte dépendance à l'égard des forêts (Mendis et coll., 2003). Les systèmes sociaux réagiront probablement aux changements climatiques d'une façon moins déterministe que les systèmes écologiques, car la réaction des systèmes sociaux en situation de crise dépend, outre de variables structurales, de la capacité et de la volonté individuelle et collective de poser des actions (Davidson, 2010). Les systèmes sociaux ont une capacité inhérente de s'adapter aux changements et menaces réels ou perçus. Par exemple, de nouveaux plans d'urgence peuvent être mis en œuvre pour faire face à des phénomènes météorologiques extrêmes. Les forêts peuvent servir d'outil pour contrer les changements climatiques, notamment par la création de mécanismes institutionnels tels que les marchés du carbone ou le Programme de collaboration des Nations Unies sur la réduction des émissions liées au déboisement et à la dégradation des forêts dans les pays en développement (REDD+). Ce type de projet découle de la capacité collective à saisir les occasions ou à répondre aux besoins, et il s'articule autour de concepts tels que la capacité des communautés, le bien-être des collectivités et la résilience (Nadeau et coll., 1999; Adger et coll., 2004; Donoghue et Sturtevant, 2007).

Les mesures qui seront proposées par la société dans le futur seront influencées par la perception des risques associés aux changements climatiques. La perception du risque (pour les biens, les marchés, la santé humaine, le bien-être, etc.) par différents acteurs sociaux constitue donc un facteur crucial à comprendre puisqu'elle influence à la fois les processus décisionnels liés aux risques et les mesures sociales subséquentes (Davidson et coll., 2003). Ces mesures pourraient être mises en œuvre plus rapidement par les acteurs qui seront, selon les prévisions, les plus directement touchés par les changements climatiques, tels que les acteurs qui dépendent des activités saisonnières comme la sylviculture, le tourisme, la lutte contre les feux de forêt et la production acéricole. McFarlane et coll. (2012) ont étudié, à l'échelle de la collectivité, la perception du risque associé à des perturbations de grande échelle causées par des insectes. Ils ont constaté que, même si les gestionnaires et les citoyens partageaient certaines préoccupations, les citoyens avaient un plus vaste éventail de préoccupations. Stedman (2004) a observé que les principaux acteurs des politiques forestières avaient une perception différente de celle des environnementalistes et des scientifiques universitaires, ces deux derniers groupes associant un risque plus élevé aux changements climatiques que les représentants de l'industrie ou des gouvernements. La documentation sur la perception des principaux facteurs de risques associés aux changements climatiques pour les écosystèmes forestiers et les systèmes sociaux qui en dépendent est vue comme étant une étape critique pour guider l'élaboration de politiques sur les changements climatiques (Hunt et Kolman, 2012). En outre, l'étude de ces perceptions pourrait nous aider à comprendre le contexte et les compromis favorisant l'adoption de stratégies d'adaptation ou d'atténuation, et à saisir les raisons qui font que ces stratégies sont mises en place dans certaines régions alors qu'elles ne le sont pas dans d'autres où les impacts des changements climatiques et les projections sont similaires.

Il est probable que les forces et les faiblesses actuelles des différentes composantes du système humain facilitent ou entravent la création et la mise en œuvre des mesures d'adaptation liées aux changements climatiques (Freundenburg, 1992; Teitelbaum et coll., 2003). De plus, les questions d'équité jouent un rôle prépondérant dans la capacité d'adaptation de la société. La répartition des avantages et des conséquences des mesures d'adaptation variera d'un segment de la société à l'autre, en raison de divers facteurs tels que le lieu géographique ou des caractéristiques culturelles, économiques ou écologiques particulières (Burdge, 2008; Lynn et coll., 2011). Vu leur situation géographique et leur forte utilisation des forêts, les collectivités éloignées et celles tributaires des ressources naturelles sont vulnérables à la sécheresse, aux crues d'embâcle, aux feux de forêt, à l'absence de gelées printanières tardives et à la hausse des températures hivernales. Ces phénomènes peuvent causer des évacuations répétées,

des perturbations des réseaux de transport vitaux et des pressions sur les économies dépendantes de la forêt. Aussi, les effets des changements climatiques sur les systèmes sociaux et la capacité de ces systèmes à réagir aux risques réels ou perçus varieront selon les échelles spatiales et sociales et se produiront à des rythmes différents.

Quels seront les effets des changements climatiques sur les dimensions humaines liées aux forêts et comment pourrait-on les mesurer?

Les changements climatiques auront probablement une incidence sur les valeurs forestières associées aux éléments humains, notamment la santé, les biens, les marchés, les infrastructures, le bien-être des collectivités (Davidson et coll., 2003) ainsi que les aspects économiques, biologiques, socioculturels, éthiques, spirituels et esthétiques (Moyer et coll., 2008). Toutefois, l'incertitude entourant les effets des changements climatiques sur les forêts risque d'engendrer une vaste gamme de perceptions chez différents acteurs sociaux quant aux valeurs qui sont à risque et au niveau de risque. Étant donné que les perceptions et les attitudes envers les risques façonnent la volonté de réagir aux changements climatiques, il est important d'évaluer les risques associés aux changements climatiques (Burdge, 2008). D'autres composantes-clés et des relations inhérentes aux systèmes sociaux, notamment la capacité des communautés (Beckley et coll., 2008) ainsi que la résilience (Lynn et coll., 2011) et le bien-être (Kusel, 2001) des collectivités tributaires de la forêt, joueront un rôle considérable dans un contexte de changements climatiques. Quelques auteurs ont déjà commencé à explorer l'utilité de ces composantes et de ces relations à l'échelle des collectivités (Mendis et coll., 2003; MacKendrick et Parkins, 2005; Williamson et coll., 2012), alors que d'autres ont plutôt adopté une approche institutionnelle et examiné la capacité des secteurs stratégiques et politiques à réagir aux changements climatiques (Craft et Howlett, 2012; Doelle et coll., 2012). De plus, étant donné la nature complexe de la capacité d'adaptation et sa sensibilité aux facteurs contextuels, le choix des indicateurs devrait être guidé par la « capacité de faire » et par l'échelle d'analyse (Adger et coll., 2004; Beckley et coll., 2008).

La capacité du système social à réagir aux changements est un facteur déterminant de sa vulnérabilité. Cette vulnérabilité variera au fil du temps, car la capacité d'adaptation sera modelée par la réaction du système aux changements émanant des dimensions environnementale, politique, sociale et économique (Adger et coll., 2004). Documenter l'état actuel des principales caractéristiques des systèmes sociaux en lien avec la capacité d'adaptation permettrait d'établir un niveau de référence afin d'être en mesure de faire un suivi de ces caractéristiques et d'acquérir une meilleure compréhension de la façon dont elles facilitent ou limitent la capacité globale du système à s'adapter aux changements climatiques. En outre, la description



Morilles (*Morchella* spp.), produit forestier non ligneux, après un feu récent (Franck Tuot).

statique pourrait alimenter une réflexion sur la sensibilité de ces constituants aux changements climatiques et servir de fondement pour l'analyse des processus par lesquels les systèmes sociaux réagissent à divers effets des changements climatiques. Les caractéristiques économiques et sociologiques susceptibles de mettre certains groupes à risque ou d'avoir une incidence sur leur capacité à réagir aux changements climatiques constituent d'importants facteurs à considérer en matière d'équité (Davidson et coll., 2003; MacKendrick et Parkins, 2005; Lynn et coll., 2011). Par exemple, Flint et coll. (2009) soulignent l'importance de recueillir des données de base (les conditions démographiques et socioéconomiques, l'importance du tourisme et la nature des attractions, la dépendance financière envers le secteur forestier, les institutions axées sur l'action communautaire et le profil d'utilisation des ressources) pour être à même de mieux comprendre la menace que représentent les perturbations attribuables aux insectes forestiers pour diverses collectivités. Les renseignements liés aux inégalités peuvent servir à la modélisation et à l'évaluation des dimensions humaines liées aux changements climatiques (Lynn et coll., 2011).

Capital naturel

Le capital naturel se rapporte aux « stocks » des ressources et des divers éléments naturels nécessaires au maintien de la vie et permettant de répondre aux besoins des humains. Les effets des changements climatiques peuvent modifier la qualité, la disponibilité et parfois l'emplacement de diverses ressources.

Utilisation de la forêt

La réponse des écosystèmes forestiers aux changements climatiques et aux modifications des facteurs climatiques ne sera pas uniforme à l'échelle du pays, ce qui donne à croire que les effets des changements sur l'utilisation de la forêt différeront probablement d'une région à l'autre. Les changements touchant la quantité et la qualité des ressources forestières (la flore et la faune) et les changements météorologiques en eux-mêmes (la température, le débit des cours d'eau et la couverture de neige) pourraient avoir des répercussions sur la pratique de diverses activités liées à la forêt et sur l'endroit où ces activités se dérouleront. Il est prévu

que les hivers canadiens vont s'adoucir et raccourcir, ce qui aura probablement pour effet de réduire l'accessibilité aux forêts. Par exemple, il est probable que les activités forestières nécessitant l'accès à des routes d'hiver diminueront en raison de la hausse des températures, qui fera en sorte que le sol ne gèle pas dans certaines régions. Le raccourcissement des hivers pourrait devancer le début de la saison des feux de forêt et réduire la durée de la saison des activités récréatives hivernales de plein air (Hunt et Kolman, 2012).

Infrastructures

Le paysage forestier est marqué par les infrastructures servant au transport personnel et commercial ainsi que par des infrastructures qui constituent les piliers d'industries et de collectivités. Les effets des changements climatiques, notamment l'augmentation des inondations, des feux de forêt et des infestations d'insectes ainsi que la modification des conditions météorologiques saisonnières, pourraient remettre en cause l'existence et complexifier l'entretien des infrastructures en milieux forestiers, ou, au contraire, créer des besoins pour de nouvelles infrastructures. Puisque les infrastructures sont coûteuses à construire et à entretenir, toute mesure visant à éviter leur défaillance aura des répercussions sur la situation financière de divers acteurs (les familles, les entreprises, les industries et les gouvernements), ce qui pourrait entraîner une hausse des taux d'imposition ou une augmentation des réclamations d'assurance.

Économie

Il est probable que les changements climatiques auront une incidence sur le tissu économique de notre société et que la situation économique sera susceptible d'affecter la capacité d'adaptation des acteurs sociaux. Le suivi des indicateurs classiques, comme la diversité économique, le niveau de dépendance envers la forêt (par ménages ou par collectivités), la demande et la production de produits forestiers et les tendances en matière d'emploi et de chômage, demeurera important. D'autres indicateurs qui seront probablement directement affectés par les changements météorologiques prévus, notamment le travail lié aux activités saisonnières (la sylviculture, la lutte contre les feux et la production acéricole), retiendront également l'attention. Des indicateurs documentant les difficultés économiques et la distribution des richesses, tels que le nombre de familles à faible revenu, pourraient aussi nous aider à tracer un portrait plus complet des effets directs et indirects que pourraient engendrer les changements climatiques dans les régions forestières. Par ailleurs, il pourrait aussi être pertinent de tenir compte de renseignements moins usuels, comme les biens économiques à risque et le coût des assurances et des mesures de protection des forêts.

Capital social

Le concept de capital social fait référence aux normes, aux réseaux sociaux ainsi qu'à la confiance qui contribuent à

l'émergence d'actions collectives. Les réseaux peuvent être formés d'individus et de leurs relations personnelles (la famille, les amis et les voisins), ou d'individus et d'organisations qui se réunissent en raison d'intérêts communs. Les réseaux sociaux sont mis à contribution lors de difficultés telles que les fermetures d'usine et les perturbations naturelles, mais de telles difficultés peuvent aussi contribuer à la formation ou au renforcement des liens et de la relation de confiance entre les acteurs sociaux (Varghese et coll., 2006; Flint et coll., 2009).

Démographie

Les caractéristiques démographiques sont un des éléments fondamentaux des systèmes sociaux. Certaines modifications provoquées par les changements climatiques risquent d'avoir des répercussions sur les mouvements d'établissement et de migration des humains et, par conséquent, sur la démographie de certaines régions. Par ailleurs, les caractéristiques démographiques (la proportion homme femme, la répartition par âge et le niveau d'éducation) sont également en lien direct avec la préparation préalable à l'adaptation.

Santé humaine

Les changements climatiques sont susceptibles d'avoir des effets directs et indirects sur la santé humaine. Certains de ces effets seront liés aux milieux forestiers. Les principales préoccupations quant aux liens entre la santé humaine et les forêts s'articulent autour de la qualité de l'air et de l'eau potable, de l'incidence de maladies à transmission vectorielle (le virus du Nil occidental, la maladie de Lyme, etc.), des effets

des phénomènes météorologiques extrêmes et de la santé mentale et physique des individus (l'asthme, les niveaux de stress, etc.).

Institutions et gouvernance

Les institutions regroupent les structures et mécanismes formels et informels destinés à guider le comportement des individus, de façon à ce que ceux-ci répondent aux normes et attentes de la société. Les changements climatiques auront une incidence sur ces normes et ces attentes, et il sera nécessaire de modifier et d'ajuster nos institutions et structures de gouvernance actuelles ainsi que nos paradigmes de gestion forestière (Glück et coll., 2009; Davidson, 2010). Selon Bruce (2003), il faudrait aménager les ponts et ponceaux traversant des cours d'eau de façon à ce que les crues plus fréquentes et les débits plus élevés puissent passer de façon sécuritaire. Toutefois, pour que ces modifications soient apportées, les institutions doivent être sensibilisées aux changements et disposer de mécanismes lui permettant de réviser les politiques, les règlements et les pratiques en fonction des changements climatiques. Dans le contexte canadien, le caractère nouveau des questions liées aux changements climatiques, l'incertitude scientifique, la nécessité de modifier les comportements et la répartition inégale des inconvénients des changements climatiques d'une région à l'autre sont autant de facteurs qui créent des défis considérables en matière de gouvernance (Rayner, 2012). Ces défis touchent tous les ordres de gouvernement (locaux, régionaux, provinciaux et fédéral) ainsi que les ONG et les industries œuvrant dans les domaines des politiques et de la gestion forestières.

Tableau 8. Éléments humains – éléments et indicateurs potentiels pour l'évaluation des impacts des changements climatiques et de la capacité d'adaptation de la société

DIMENSIONS	ÉLÉMENTS ^a	INDICATEURS POTENTIELS	CONSIDÉRATIONS
Capital naturel	Qualité de l'air (imp.)	Nombre de jours où une consigne de limitation des activités est émise en raison de la fumée des feux de forêt. Nombre de personnes admises à l'hôpital en raison de la fumée des feux de forêt.	Les effets des changements climatiques sur le système biophysique créent des perturbations sociales.
	Couverture de neige et disponibilité de glace (activités récréatives hivernales, exploitation et transport) (imp.)		
	Faune : espèces, qualité, quantité et emplacement (imp.)		
	Flore : espèces, qualité, quantité et emplacement (imp.)		
	Esthétique des paysages (imp., cap.)		
	Perturbations sociales liées au climat (feux, inondations, chaleur, verglas, relocalisation, etc.) (imp.)		
	Phénomènes météorologiques extrêmes (imp.)	Nombre de jours d'évacuation, par collectivité, causée par des phénomènes météorologiques extrêmes. Nombre de jours où les refuges d'urgence sont utilisés en raison de phénomènes météorologiques extrêmes. Coût des défaillances d'infrastructures causées par des phénomènes météorologiques.	
	Services écosystémiques : maintien et perturbation des services (imp.)		

^a Bien qu'il n'ait pas toujours été possible de séparer clairement les impacts des changements climatiques et la capacité d'adaptation, les éléments ont été catégorisés selon qu'ils étaient liés à l'évaluation des impacts (imp.) des changements climatiques sur les éléments humains ou à l'évaluation de la capacité d'adaptation (cap.), en fonction de l'opinion d'experts. Ainsi, les indicateurs de la perception du risque et de l'équité (deux items qui ont une incidence sur la capacité d'adaptation) peuvent s'appliquer dans le cas de plusieurs éléments. Ils constituent des indicateurs transversaux et peuvent être évalués en fonction des éléments ci-dessous.

- Perception du risque et niveau de sensibilisation : risques liés aux fonctions et systèmes écologiques, aux biens et infrastructures, à la santé humaine, au bien-être et à l'utilisation de la forêt, et sensibilisation aux changements climatiques (compréhension, communication, attitude et connaissances sur le climat).
- Équité : statut socioéconomique des populations vulnérables (collectivités tributaires des forêts), revenu moyen et revenu médian des ménages, niveau d'emploi par groupe d'âge (et par sexe), accès aux services de base et dimensions procédurale et distributive.

Ces éléments et indicateurs-clés sont inspirés des travaux de nombreux chercheurs et comités qui ont étudié la capacité d'adaptation (Beckley et coll., 2002; Mendis et coll., 2003; Adger et coll., 2004; Mackendrick et Parkins, 2005; Beckley et coll., 2008; Centre for Indigenous Environmental Resources, 2009; Glück et coll., 2009; Innes et coll., 2009; Kenney et coll., 2011; Michalos et coll., 2011).

(à suivre)

Tableau 8. (suite)

DIMENSIONS	ÉLÉMENTS ^a	INDICATEURS POTENTIELS	CONSIDÉRATIONS
Utilisation de la forêt	Récolte de bois (imp.)	Méthodes de récolte (superficie et pourcentage du volume total). Nombre de jours où la récolte est possible en hiver. Proportion de routes d'hiver par rapport aux routes forestières régulières. Modification des normes de construction des routes.	Beckley (1998) a présenté une typologie de l'utilisation des forêts par les humains. Cette typologie nous a servi de point de départ pour comprendre la façon dont ces utilisations pourraient être touchées par les changements climatiques. Selon l'échelle à laquelle des renseignements sur l'utilisation des forêts doivent être recueillis, divers groupes récréatifs, entreprises et associations pourraient fournir des renseignements sur l'utilisation qu'ils font de la forêt. Il pourrait aussi être pertinent de recueillir des renseignements sur les personnes qui utilisent les ressources, pour avoir un aperçu des déplacements potentiels d'activités (p. ex., résidents ou non-résidents). Les études et sondages menés par EC en vue de comprendre la valeur de la nature aux yeux des Canadiens et les activités liées à la nature qu'ils pratiquent pourraient aussi nous fournir des renseignements utiles (Biodivcanada, 2012). D'autres sources, comme le rapport <i>L'activité humaine et l'environnement</i> de Statistique Canada (Statistique Canada, 2012), et la base de données de l'Enquête auprès des peuples autochtones, utilisés par Bogdanski (2008) pour étudier l'état du secteur forestier dans la région boréale, pourraient aussi être utiles si elles étaient mises à jour.
	Produits forestiers ligneux (imp.)	Quantité de produits, par groupe d'espèces. Qualité du bois récolté.	
	Sylviculture (imp.)	Espèces d'arbres plantés et nombre. Nombre de jours où les activités de sylviculture peuvent être pratiquées.	
	Produits forestiers non ligneux (imp.)	Quantité de produits : champignons, petits fruits, produits de l'érable, produits d'origine végétale, arbres de Noël, verdure. Qualité des produits. Zones géographiques où la production est possible. Nombre de jours pour la production saisonnière.	
	Subsistance (imp.)	Disponibilité des ressources pour la récolte (aliments, combustible, bois, poisson, animaux et plantes médicinales). Modification de la disponibilité (moment et emplacement).	
	Tourisme et activités récréatives axées sur la nature : observation de la faune et de la flore, randonnée/motoneige, centre de villégiature/chalets, écotourisme et chasse/pêche (imp., cap.)	Observation de la faune. Paysages automnaux. Nombre de jours pour les activités hivernales et durée de la saison touristique. Sentiers récréatifs à risque (randonnée, véhicules tout-terrain, motoneige, ski et raquette). Chasse et pêche : durée de la saison, emplacements et taux de succès.	
	Services écologiques (imp., cap.)	Qualité de l'air. Qualité de l'eau et quantité d'eau. Séquestration du C et sol. Existence/legs (biodiversité, conservation, etc.). Valeur historique et spirituelle.	

^a Bien qu'il n'ait pas toujours été possible de séparer clairement les impacts des changements climatiques et la capacité d'adaptation, les éléments ont été catégorisés selon qu'ils étaient liés à l'évaluation des impacts (imp.) des changements climatiques sur les éléments humains ou à l'évaluation de la capacité d'adaptation (cap.), en fonction de l'opinion d'experts. Ainsi, les indicateurs de la perception du risque et de l'équité (deux items qui ont une incidence sur la capacité d'adaptation) peuvent s'appliquer dans le cas de plusieurs éléments. Ils constituent des indicateurs transversaux et peuvent être évalués en fonction des éléments ci-dessous.

- Perception du risque et niveau de sensibilisation : risques liés aux fonctions et systèmes écologiques, aux biens et infrastructures, à la santé humaine, au bien-être et à l'utilisation de la forêt, et sensibilisation aux changements climatiques (compréhension, communication, attitude et connaissances sur le climat).
- Équité : statut socioéconomique des populations vulnérables (collectivités tributaires des forêts), revenu moyen et revenu médian des ménages, niveau d'emploi par groupe d'âge (et par sexe), accès aux services de base et dimensions procédurale et distributive.

Ces éléments et indicateurs-clés sont inspirés des travaux de nombreux chercheurs et comités qui ont étudié la capacité d'adaptation (Beckley et coll., 2002; Mendis et coll., 2003; Adger et coll., 2004; MacKendrick et Parkins, 2005; Beckley et coll., 2008; Centre for Indigenous Environmental Resources, 2009; Gluck et coll., 2009; Innes et coll., 2009; Kenney et coll., 2011; Michalos et coll., 2011).

(à suivre)

Tableau 8. (suite)

DIMENSIONS	ÉLÉMENTS ^a	INDICATEURS POTENTIELS	CONSIDÉRATIONS
Infrastructures	Transport : routes, voies ferrées, aéroports et sentiers récréatifs (envergure du réseau, caractéristiques physiques et emplacement) (imp.)	Envergure du réseau. Emplacement. Nombre de jours où les réseaux peuvent être utilisés (routes d'hiver, pont de glace, fermetures liées aux risques de feu ou à des feux, etc.). Coût de la construction et de l'entretien de routes et de sentiers en forêt.	Fiabilité des infrastructures existantes sous des conditions changeantes. Besoins pour de nouvelles infrastructures ou amélioration des infrastructures existantes.
	Industries et commerces : bâtiments servant à l'industrie forestière et aux services forestiers, au tourisme axé sur la nature (imp.).		
	Services : hôpitaux, écoles, centres communautaires, égouts, approvisionnement en eau, etc. (imp., cap.)		
	Aspect financier : revenus fiscaux, pertes de biens, réclamations d'assurance et taux d'imposition (imp., cap.).		

^a Bien qu'il n'ait pas toujours été possible de séparer clairement les impacts des changements climatiques et la capacité d'adaptation, les éléments ont été catégorisés selon qu'ils étaient liés à l'évaluation des impacts (imp.) des changements climatiques sur les éléments humains ou à l'évaluation de la capacité d'adaptation (cap.), en fonction de l'opinion d'experts. Ainsi, les indicateurs de la perception du risque et de l'équité (deux items qui ont une incidence sur la capacité d'adaptation) peuvent s'appliquer dans le cas de plusieurs éléments. Ils constituent des indicateurs transversaux et peuvent être évalués en fonction des éléments ci-dessous.

- Perception du risque et niveau de sensibilisation : risques liés aux fonctions et systèmes écologiques, aux biens et infrastructures, à la santé humaine, au bien-être et à l'utilisation de la forêt, et sensibilisation aux changements climatiques (compréhension, communication, attitude et connaissances sur le climat).
- Équité : statut socioéconomique des populations vulnérables (collectivités tributaires des forêts), revenu moyen et revenu médian des ménages, niveau d'emploi par groupe d'âge (et par sexe), accès aux services de base et dimensions procédurale et distributive.

Ces éléments et indicateurs-clés sont inspirés des travaux de nombreux chercheurs et comités qui ont étudié la capacité d'adaptation (Beckley et coll., 2002; Mendis et coll., 2003; Adger et coll., 2004; MacKendrick et Parkins, 2005; Beckley et coll., 2008; Centre for Indigenous Environmental Resources, 2009; Glück et coll., 2009; Innes et coll., 2009; Kenney et coll., 2011; Michalos et coll., 2011).

(à suivre)

Tableau 8. (suite)

DIMENSIONS	ÉLÉMENTS ^a	INDICATEURS POTENTIELS	CONSIDÉRATIONS
Économie	Diversité économique (cap.)		Les indicateurs et les activités économiques sont influencés par une vaste gamme d'indicateurs sociaux et économiques à différents niveaux.
	Degré de dépendance envers la forêt (cap.)		
	Demande et production de produits ligneux et non ligneux (type de produit, marché, etc.) (imp., cap.)		
	Secteur économique/rentabilité des entreprises (imp., cap.)	Revenus totaux. Dépenses totales. Revenus nets.	
	Niveau d'emploi par secteur (cap.)		
	Taux de chômage (imp., cap.)		
	Modification du travail (moment où le travail peut être fait, productivité et heures supplémentaires) (imp., cap.)		
	Nombre de ménages à faible revenu (difficultés économiques et richesse) (imp., cap.)		
	Revenu moyen et revenu médian des ménages (difficultés économiques et richesse) (cap.)		
	Biens économiques à risque : individus, collectivités, entreprises et industrie (cap.)		
	Assurances (accessibilité et coûts) (imp., cap.)	Coût moyen de l'assurance-habitation dans les zones forestières, en fonction de risques accrus de feux de forêt, d'inondations, etc. Nombre de réclamations d'assurance attribuables aux phénomènes météorologiques extrêmes et aux perturbations naturelles dans les zones forestières, et montants de ces réclamations.	
	Coût des mesures d'urgence (imp.)	Coûts associés aux refuges et au soutien offert aux personnes touchées. Coût des mesures d'urgence pour contrer les phénomènes météorologiques extrêmes.	
	Coût de la protection de la forêt (feux et insectes) (imp.)	Coût des activités de protection des forêts. Coûts associés aux fermetures causées par les risques élevés de feu ou par les feux.	

^a Bien qu'il n'ait pas toujours été possible de séparer clairement les impacts des changements climatiques et la capacité d'adaptation, les éléments ont été catégorisés selon qu'ils étaient liés à l'évaluation des impacts (imp.) des changements climatiques sur les éléments humains ou à l'évaluation de la capacité d'adaptation (cap.), en fonction de l'opinion d'experts. Ainsi, les indicateurs de la perception du risque et de l'équité (deux items qui ont une incidence sur la capacité d'adaptation) peuvent s'appliquer dans le cas de plusieurs éléments. Ils constituent des indicateurs transversaux et peuvent être évalués en fonction des éléments ci-dessous.

- Perception du risque et niveau de sensibilisation : risques liés aux fonctions et systèmes écologiques, aux biens et infrastructures, à la santé humaine, au bien-être et à l'utilisation de la forêt, et sensibilisation aux changements climatiques (compréhension, communication, attitude et connaissances sur le climat)
- Équité : statut socioéconomique des populations vulnérables (collectivités tributaires des forêts), revenu moyen et revenu médian des ménages, niveau d'emploi par groupe d'âge (et par sexe), accès aux services de base et dimensions procédurale et distributive.

Ces éléments et indicateurs-clés sont inspirés des travaux de nombreux chercheurs et comités qui ont étudié la capacité d'adaptation (Beckley et coll., 2002; Mendis et coll., 2003; Adger et coll., 2004; Mackendrick et Parkins, 2005; Beckley et coll., 2008; Centre for Indigenous Environmental Resources, 2009; Gluck et coll., 2009; Innes et coll., 2009; Kenney et coll., 2011; Michalos et coll., 2011).

(à suivre)

Tableau 8. (suite)

DIMENSIONS	ÉLÉMENTS ^a	INDICATEURS POTENTIELS	CONSIDÉRATIONS
Capital social	Sentiment d'appartenance/attachement au lieu (en tant que groupe) (cap.)		Voir McFarlane et coll. (2012) pour des renseignements sur l'enjeu de la confiance. L'engagement social, la capacité et les résultats des indicateurs actuels et passés. Les liens avec le climat seront difficiles à démontrer et ils doivent être faits avec prudence.
	Identité culturelle et savoirs traditionnels (imp., cap.)	Utilisation de l'histoire orale. Utilité des savoirs traditionnels.	
	Engagement social (bénévolat, membres d'associations et participation à des activités) (cap.)		
	Leadership (sens des responsabilités envers un groupe ou une collectivité) (cap.)		
	Confiance (au sein d'un groupe et envers les autres) (cap.)		
	Relations/réseaux (formels et informels) (cap.)		
	Cohésion sociale (force des réseaux) (cap.)		
	Taux de criminalité (biens et personnes) (cap.)		
	Engagement démocratique (cap.)		
	Conflits liés aux ressources forestières (disponibilité, utilisation et gestion) (imp., cap.)		
Démographie	Âge et sexe (cap.)		Les données de Statistique Canada pourraient être utiles.
	Niveau d'études (cap.)		
	Taux d'alphabétisation (cap.)		
	Établissement et mouvement de la population (densité et lieu). Par exemple, l'interface entre le milieu urbain et le milieu rural (cap.)		
	Accès aux savoirs traditionnels (cap.)		
Santé humaine	Disponibilité et qualité de l'eau potable (imp.)		
	Santé physique et mentale des individus (imp., cap.)		
	Effets des vagues de chaleur, des inondations et des sécheresses (imp., cap.)		
	Incidence de maladies à transmission vectorielle (imp., cap.)		

^a Bien qu'il n'ait pas toujours été possible de séparer clairement les impacts des changements climatiques et la capacité d'adaptation, les éléments ont été catégorisés selon qu'ils étaient liés à l'évaluation des impacts (imp.) des changements climatiques sur les éléments humains ou à l'évaluation de la capacité d'adaptation (cap.), en fonction de l'opinion d'experts. Ainsi, les indicateurs de la perception du risque et de l'équité (deux items qui ont une incidence sur la capacité d'adaptation) peuvent s'appliquer dans le cas de plusieurs éléments. Ils constituent des indicateurs transversaux et peuvent être évalués en fonction des éléments ci-dessous.

- Perception du risque et niveau de sensibilisation : risques liés aux fonctions et systèmes écologiques, aux biens et infrastructures, à la santé humaine, au bien-être et à l'utilisation de la forêt, et sensibilisation aux changements climatiques (compréhension, communication, attitude et connaissances sur le climat).
- Équité : statut socioéconomique des populations vulnérables (collectivités tributaires des forêts), revenu moyen et revenu médian des ménages, niveau d'emploi par groupe d'âge (et par sexe), accès aux services de base et dimensions procédurale et distributive.

Ces éléments et indicateurs-clés sont inspirés des travaux de nombreux chercheurs et comités qui ont étudié la capacité d'adaptation (Beckley et coll., 2002; Mendis et coll., 2003; Adger et coll., 2004; Mackendrick et Parkins, 2005; Beckley et coll., 2008; Centre for Indigenous Environmental Resources, 2009; Glück et coll., 2009; Innes et coll., 2009; Kenney et coll., 2011; Michalos et coll., 2011).

(à suivre)

Tableau 8. (suite et fin)

DIMENSIONS	ÉLÉMENTS ^a	INDICATEURS POTENTIELS	CONSIDÉRATIONS
Institutions et gouvernance	Obstacles internes et externes à l'adaptation. (cap.)		<p>En ce qui a trait aux institutions, nous pouvons étudier la façon dont les différentes structures de gouvernance et structures institutionnelles sont touchées par les problèmes liés aux changements climatiques (affectation des ressources, collaboration accrue ou conflits) ainsi que la façon dont elles relèvent les défis à cet égard. Klenk (2012) a identifié quatre stratégies qui ont très fréquemment été utilisées par divers acteurs : résistance, résilience, réaction (facilitation) et atténuation. Ces stratégies interviennent aux niveaux stratégique, tactique ou opérationnel dans le cadre du processus de prise de décision. Ces stratégies reflètent diverses visions institutionnelles sur la façon d'aborder les changements climatiques, et elles sont combinées avec d'autres approches en vue de la révision de politiques, de règlements et de pratiques, en fonction des changements climatiques.</p> <p>Le suivi d'ententes de collaboration ou de partenariat en lien avec des phénomènes climatiques, des plans de préparation aux situations d'urgence et des systèmes d'alerte précoce pourrait aussi nous aider à expliquer comment les effets des changements climatiques et les prévisions concernant ces changements influent sur les institutions et les structures de gouvernance.</p>
	Coordination organisationnelle (niveaux de planification des politiques et intervention en cas de crise). (cap.)	Nombre de services d'incendie et de services d'urgence qui ont conclu des accords de partage.	
	Capacité institutionnelle liée aux problèmes causés par les changements climatiques. (cap.)	Nombre de postes créés par les gouvernements pour répondre aux besoins de recherche ou d'adaptation liés aux changements climatiques.	
	Mandat et ressources allouées et adaptées en fonction des changements climatiques. (cap.)		
	Mécanisme de révision des politiques, des règlements et des pratiques en fonction des changements climatiques (possibilité annuelle de coupe, pratiques forestières comme la plantation, saison de chasse et de pêche, etc.). (cap.)		
	Mise en application des politiques et des règlements et vérification de la conformité. (cap.)		
	Coopération et établissement de partenariats. (cap.)		
	Répartition du pouvoir en matière de prise de décision. (cap.)		
	Accès aux connaissances liées au climat et utilisation de ces connaissances. (cap.)		
	Rôle de la société civile. (cap.)		
	Plan de préparation aux situations d'urgence. (cap.)		
	Systèmes d'alerte précoce. (cap.)		
	Niveau de préparation. (cap.)	Nombre de collectivités qui ont mis en œuvre le programme FireSmart. Pourcentage de participation au programme FireSmart.	
	Confiance envers les institutions. (cap.)		

^a Bien qu'il n'ait pas toujours été possible de séparer clairement les impacts des changements climatiques et la capacité d'adaptation, les éléments ont été catégorisés selon qu'ils étaient liés à l'évaluation des impacts (imp) des changements climatiques sur les éléments humains ou à l'évaluation de la capacité d'adaptation (cap.), en fonction de l'opinion d'experts. Ainsi, les indicateurs de la perception du risque et de l'équité (deux items qui ont une incidence sur la capacité d'adaptation) peuvent s'appliquer dans le cas de plusieurs éléments. Ils constituent des indicateurs transversaux et peuvent être évalués en fonction des éléments ci-dessous.

- Perception du risque et niveau de sensibilisation : risques liés aux fonctions et systèmes écologiques, aux biens et infrastructures, à la santé humaine, au bien-être et à l'utilisation de la forêt, et sensibilisation aux changements climatiques (compréhension, communication, attitude et connaissances sur le climat).
- Équité : statut socioéconomique des populations vulnérables (collectivités tributaires des forêts), revenu moyen et revenu médian des ménages, niveau d'emploi par groupe d'âge (et par sexe), accès aux services de base et dimensions procédurale et distributive.

Ces éléments et indicateurs-clés sont inspirés des travaux de nombreux chercheurs et comités qui ont étudié la capacité d'adaptation (Beckley et coll., 2002; Mendis et coll., 2003; Adger et coll., 2004; MacKendrick et Parkins, 2005; Beckley et coll., 2008; Centre for Indigenous Environmental Resources, 2009; Gluck et coll., 2009; Innes et coll., 2009; Kenney et coll., 2011; Michalos et coll., 2011).

PERSPECTIVE : OCCASIONS ET DÉFIS

La santé et la productivité des forêts et du secteur forestier canadiens sont liées, à la fois directement et indirectement, au climat. Les changements climatiques devraient avoir des effets sur de nombreux aspects touchant l'environnement, l'économie et la société. En plus de mettre en œuvre des stratégies d'atténuation, le secteur forestier devra s'adapter, de manière proactive dans la mesure du possible, aux impacts de ces changements. Les mesures d'adaptation doivent s'inscrire dans un cadre adaptatif permettant d'évaluer en continu leur efficacité. La boucle de rétroaction intégrée au processus, axée sur le suivi, l'évaluation et la mise en œuvre de mesures correctives, permet d'évaluer l'écart entre les conditions observées et les conditions souhaitées et donc d'améliorer les connaissances et les outils. Ce processus adaptatif et itératif de prise de décision permettra sans doute d'améliorer la gestion des forêts et du secteur forestier en réponse non seulement aux impacts des changements climatiques, mais aussi aux effets d'autres types de fluctuations (le marché, l'évolution des valeurs, les changements à l'échelle mondiale, etc.).

Le travail effectué dans le cadre du présent rapport pour sélectionner des indicateurs potentiels sur les effets des changements climatiques montre qu'à l'échelle mondiale, les processus liés au classement des indicateurs par ordre de priorité et à l'élaboration de programmes de suivi en sont encore aux tout premiers stades. D'autres travaux seront nécessaires pour évaluer la faisabilité, la portée spatiotemporelle et la pertinence des indicateurs par rapport aux objectifs du système de suivi. L'attribution des indicateurs aux différents systèmes et la définition des critères de sélection fournissent un point de départ pour le classement par ordre de priorité des indicateurs proposés en vue d'un futur suivi. Comme le système humain réagira sans doute aux changements climatiques de façon moins déterministe que les systèmes écologiques, les efforts déployés pour comprendre, définir et suivre les indicateurs de ce système auront une importance cruciale notamment pour l'évaluation de l'efficacité des mesures d'adaptation mises en œuvre.

La surveillance de tous les indicateurs en tout lieu pourrait s'avérer très coûteuse, compte tenu de la grande superficie et de l'éloignement des forêts du Canada. Les programmes de recherche et de surveillance conventionnels ayant recours aux techniques de télédétection et aux inventaires forestiers nationaux (l'IFN ou les inventaires des provinces et des territoires), auxquels on pourrait apporter de légers ajustements, pourraient être utiles pour le suivi de certains des indicateurs proposés. Des programmes scientifiques citoyens, soutenus par différents groupes (Dickinson et coll., 2012), notamment des chercheurs et des professeurs (p. ex., Zoellick et coll., 2012), pourraient offrir un moyen économique de recueillir de l'information. Le déploiement hiérarchique des

indicateurs pourrait également contribuer à réduire les coûts. On pourrait, par exemple, surveiller des indicateurs forestiers précis selon différentes échelles spatiales. À l'échelle nationale, on surveillerait les indicateurs au moyen de techniques de télédétection pour repérer les endroits où certains effets des changements climatiques seraient plus marqués. À l'échelle régionale, des activités de surveillance ciblées seraient ensuite réalisées pour assurer le suivi. L'encadré 2 illustre cette possibilité à l'aide d'un exemple : l'effet des changements climatiques sur l'aire de répartition de la tordeuse des bourgeons de l'épinette. Les observations recueillies montrent que l'aire de répartition actuelle de certains insectes, comme la tordeuse des bourgeons de l'épinette, s'étend vers le nord, ce qui pourrait avoir un impact sur la productivité des écosystèmes et des forêts. Comme il est possible que les effets résultants dépendent de certaines interactions entre les hôtes et les espèces nuisibles, il pourrait être nécessaire d'établir de nouveaux indicateurs portant spécifiquement sur ces interactions. Beckley (2009) propose d'adopter une approche multidimensionnelle prévoyant l'utilisation d'un groupe d'indicateurs identiques à toutes les échelles spatiales, d'un deuxième groupe d'indicateurs liés à des thèmes similaires et d'un troisième groupe d'indicateurs locaux reflétant le caractère particulier d'un endroit donné ou d'un cadre précis de gestion des forêts. Une telle approche pourrait contribuer à équilibrer la représentativité des indicateurs par rapport à différents environnements, types de gouvernance et paliers institutionnels.

La mise en œuvre d'indicateurs exige l'élaboration de normes pour la collecte systématique des données. Ces normes devraient permettre la comparabilité des données et leur compilation dans un dépôt central (système d'entreposage de données), le but étant de permettre l'exploration des données et l'analyse des tendances par divers intervenants. Citons à titre d'exemple l'Inventaire forestier national (IFN). L'IFN, fondé sur des protocoles normalisés et des cadres d'échantillonnage communs, a pour objet d'évaluer et de surveiller l'étendue, l'état et le développement durable des forêts du Canada. Le processus de normalisation exige une communication continue et un travail de coordination important parmi les institutions participantes. Ainsi, le *US National Ecological Observatory Network* (NEON, 2011) et les programmes Opération floraison de l'Alberta et du Canada (Beaubien et Hamann, 2011) reposent sur des infrastructures efficaces, mises en place pour permettre la gestion de programmes d'envergure axés sur les données. En fait, l'utilisation d'Internet et de systèmes d'information géographique rend possible la collecte de grands volumes de données écologiques géoréférencées pouvant être enregistrées dans des bases de données centralisées avec capacité d'entrée de données (p. ex., <http://www.citsci.org/cwis438/websites/citsci/home.php?WebSiteID=7>), infrastructures de partage de données et portails d'accès sur le Web (Dickinson et coll., 2012). De plus,

en amenant les représentants de différents milieux à participer à la collecte, à la visualisation et à la diffusion de données, les programmes existants offrent de bons exemples de réussite en matière de sensibilisation aux changements climatiques. Il faut aussi pouvoir communiquer les connaissances techniques à une grande variété d'utilisateurs de manière intéressante et compréhensible, en portant une attention particulière aux publics cibles (comme les principaux décideurs) qui sont les plus susceptibles de rechercher et d'utiliser ce genre d'information.

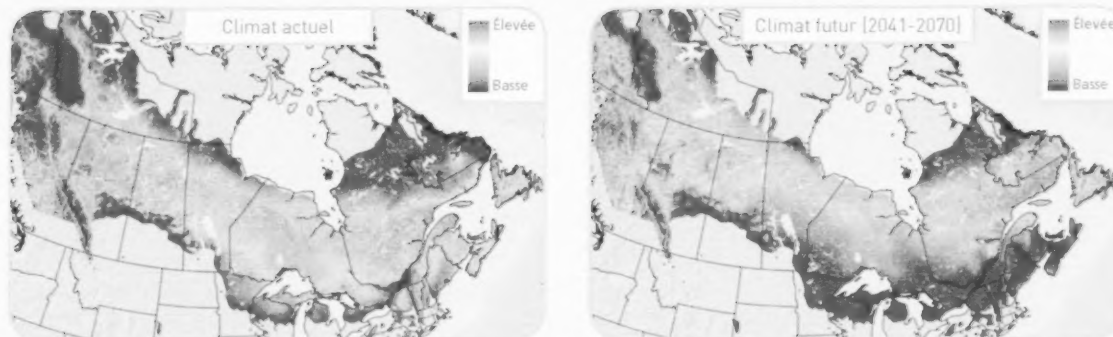
La collaboration et la coordination parmi les intervenants sont des éléments cruciaux pour la mise en œuvre de toutes les composantes d'un système de suivi (la collecte des données, l'uniformisation des données, l'entreposage des données, l'infrastructure de manipulation des données et la communication). Il sera essentiel que les différents intervenants établissent des partenariats afin de pouvoir enrichir et exploiter collectivement les données existantes et nouvelles dans le but d'assurer la viabilité d'un vaste programme de surveillance et de collecte de données (y compris la capacité de faire rapport) sur les changements climatiques. Plusieurs programmes multilatéraux liés au suivi des effets des changements climatiques sur les forêts du Canada sont déjà en place et peuvent être exploités, qu'il s'agisse de programmes d'essais de provenance à long terme, d'essais sylvicoles ou d'inventaire forestier. On compte cependant moins d'exemples de ce type de programme de surveillance en ce qui concerne la capacité d'adaptation et les éléments connexes du système humain, mis à part l'information sur l'industrie et les marchés des produits forestiers.

De façon globale, l'information recueillie pour mettre sur pied un système de suivi peut promouvoir l'adaptation si

elle facilite la compréhension des effets des changements climatiques et favorise la sensibilisation à cet égard, et si elle permet d'augmenter le niveau de préparation en vue de l'adaptation. Des options peuvent être évaluées selon différents scénarios et être mises en œuvre pour réduire l'écart entre les conditions observées et les conditions souhaitées. La réussite de l'adaptation repose sur un dernier élément-clé : un suivi adéquat de l'efficacité des mesures d'adaptation prises, de sorte que l'amélioration continue puisse être intégrée au processus d'adaptation aux changements climatiques.

La mise sur pied d'un vaste programme de surveillance et de collecte de données (y compris la capacité de faire rapport) sur les changements climatiques peut sembler coûteuse à court terme, mais il faut prendre en considération le coût de ne pas s'adapter. Les changements climatiques sont une réalité à court et à long terme : les effets seront sans doute cumulatifs et considérables. L'adaptation devrait générer de nombreux bénéfices pour le secteur forestier canadien en lui permettant de réagir non seulement aux changements climatiques, mais aussi à de multiples sources de stress. Grâce à un tel cadre adaptatif, les forêts et le secteur forestier du Canada pourront continuer à fournir des services aux Canadiens et à contribuer à leur bien-être. La publication du présent rapport constitue un premier pas vers la mise en œuvre d'un système visant à effectuer le suivi d'indicateurs des effets des changements climatiques sur les forêts et le secteur forestier au Canada. Ce système jouera un rôle essentiel en matière d'adaptation dans le contexte des changements climatiques.

Encadré 2. Exemple d'approche hiérarchique en matière de surveillance



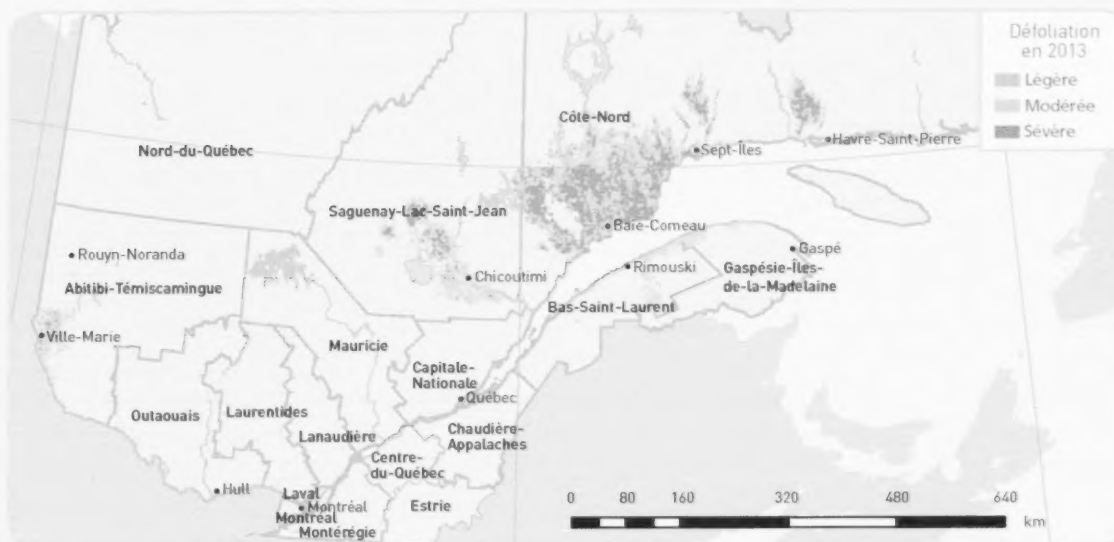
Indice du taux de croissance des populations de la TBE par rapport au couvert forestier (%). (adapté de Régnière et coll., 2012b).

Prévisions des modèles En raison des changements climatiques, l'aire de répartition de la tordeuse des bourgeons de l'épinette (*Choristoneura fumiferana*) devrait se déplacer vers le nord, dans des écosystèmes forestiers dominés par l'épinette noire (*Picea mariana*) qui étaient auparavant peu affectés par cet insecte. Au Canada, les modèles prédisent une expansion de l'aire de répartition de 3 degrés vers le nord au cours des 50 prochaines années (Régnière et coll., 2012b).

Observations actuelles Les observations confirment les prévisions. Les foyers d'infestation actuels ont été détectés dans le nord-est du Québec à compter de 2006 (voir la carte ci-dessous).

Prévisions et nécessité de suivre de nouveaux indicateurs Avec les changements climatiques, certaines zones de la forêt boréale pourraient présenter un risque élevé de défoliation.

Grâce à la hausse des températures, la tordeuse des bourgeons de l'épinette complètera son cycle vital avec un taux de mortalité moindre et ne dépendra plus de la migration en provenance des régions plus au sud, au cours des phases d'infestation, pour pouvoir s'attaquer aux arbres des latitudes nordiques. De plus, à mesure que les températures augmenteront sous ces latitudes, la phénologie de l'insecte pourrait se synchroniser avec celle de l'épinette noire, qui est l'essence dominante dans les régions nordiques. Le potentiel de dispersion de la tordeuse des bourgeons de l'épinette et l'étendue de l'aire de répartition de l'arbre qui lui sert d'hôte permettront à l'insecte d'agrandir son aire de répartition et de maintenir ses effectifs dans des régions où des contraintes climatiques limitaient auparavant sa persistance à long terme. La surveillance de la phénologie et des effets potentiels sur les écosystèmes nous renseignera sur les changements à venir et nous aidera à proposer des mesures d'adaptation susceptibles de réduire les effets sur l'écosystème de la forêt d'épinette noire.



Zones de défoliation dues à la progression de l'infestation de la TBE dans le nord-est du Québec (données du tableau : ministère des Ressources naturelles du Québec, 2013, <http://donnees.gouv.qc.ca>).

RÉFÉRENCES

- [ACIA] Arctic Climate Impact Assessment. 2004. Impacts of a warming Arctic: Arctic climate impact assessment. Cambridge University Press, Cambridge, UK. 140 p.
- Adger, N.W.; Brooks, N.; Bentham, G.; Agnew, M.; Eriksen, S. 2004. New indicators of vulnerability and adaptive capacity. Tyndall Centre for Climate Change Research, Norwich, UK.
- Aitken, S.N.; Yeaman, S.; Holliday, J.A.; Wang, T.; Curtis-McLane, S. 2008. Adaptation, migration or extirpation: climate change outcomes for tree populations. *Evol. Appl.* 1:95–111.
- Allen, C.D.; Macalady, A.K.; Chenchouni, H.; Bachelet, D.; McDowell, N.; Vennetier, M.; Kitzberger, T.; Rigling, A.; Breshears, D.D.; Hogg, E.H.; Gonzalez, P.; Fensham, R.; Zhang, Z.; Castro, J.; Demidova, N.; Lim, J.-H.; Allard, G.; Running, S.W.; Semerci, A.; Cobb, N. 2010. A global overview of drought and heat-induced tree mortality reveals emerging climate change risks for forests. *For. Ecol. Manag.* 259:660–684.
- Araújo, M.B.; Peterson, A.T. 2012. Uses and misuses of bioclimatic envelope modeling. *Ecology* 93:1527–1539.
- Arnell, N.W.; Lowe, J.A.; Brown, S.; Gosling, S.N.; Gottschalk, P.; Hinkel, J.; Lloyd-Hughes, B.; Nicholls, R.J.; Osborn, T.J.; Osborne, T.M.; Rose, G.A.; Smith, P.; Warren, R.F. 2013. A global assessment of the effects of climate policy on the impacts of climate change. *Nat. Clim. Change* 3:512–519.
- Ashley, W.S.; Mote, T.L. 2005. Derecho hazards in the United States. *Bull. Am. Meteorol. Soc.* 86:1577–1592.
- Aubin, I.; Gachet, S.; Messier, C.; Bouchard, A. 2007. How resilient are northern hardwood forests to human disturbance? An evaluation using a plant functional group approach. *Écoscience* 14:259–271.
- Aubin, I.; Garbe, C.M.; Colombo, S.; Drever, C.R.; McKenney, D.W.; Messier, C.; Pedlar, J.; Saner, M.A.; Venier, L.; Wellstead, A.M.; Winder, R.; Witten, E.; Ste-Marie, C. 2011. Why we disagree about assisted migration: ethical implications of a key debate regarding the future of Canada's forests. *For. Chron.* 87:755–765.
- Bale, J.S.; Masters, G.J.; Hodgkinson, I.D.; Awmack, C.; Bezemer, T.M.; Brown, V.K.; Butterfield, J.; Buse, A.; Coulson, J.C.; Farrar, J.; Good, J.E.G.; Harrington, R.; Hartley, S.; Jones, T.H.; Lindroth, R.L.; Press, M.C.; Symrnioudis, I.; Watt, A.D.; Whittaker, J.B. 2002. Herbivory in global climate change research: direct effects of rising temperature on insect herbivores. *Glob. Change Biol.* 8:1–16.
- Beaubien, E. 1997. Plantwatch: tracking the biotic effects of climate change using students and volunteers – is spring earlier on the Prairies? Pages 66–68 in *The Ecological Monitoring and Assessment Network Report* (Environment Canada), Third National Science Meeting, January 1997. Saskatoon, SK.
- Beaubien, E.; Hamann, A. 2011. Plant phenology networks of citizen scientists: recommendations from two decades of experience in Canada. *Int. J. Biometeorol.* 55:833–841.
- Beaubien, E.G.; Freeland, H.J. 2000. Spring phenology trends in Alberta, Canada: links to ocean temperature. *Int. J. Biometeorol.* 44:53–59.
- Beckley, T.; Parkins, J.; Stedman, R.C. 2002. Indicators of forest-dependent community sustainability: the evolution of research. *For. Chron.* 78:626–636.
- Beckley, T.M. 1998. The nestedness of forest dependence: a conceptual framework and empirical exploration. *Soc. Nat. Resour.* 11:101–120.
- Beckley, T.M. 2009. A hybrid indicators approach and process. Paper presented at *Assessing the Ability of Forest-based Communities to Respond to Transformative Change*. Model Forest Network, Toronto, ON.
- Beckley, T.M.; Martz, D.; Nadeau, S.; Wall, E.; Reimer, B. 2008. Multiple capacities, multiple outcomes: delving deeper into the meaning of community capacity. *J. Rural Community Dev.* 3:56–75.
- Bella, I.E.; Navratil, S. 1987. Growth losses from winter drying (red belt damage) in lodgepole pine stands on the east slopes of the Rockies in Alberta. *Can. J. For. Res.* 17:1289–1292.
- Bentz, B.J.; Régnière, J.J.; Fettig, C.J.; Hansen, E.M.; Hayes, J.L.; Hicke, J.A.; Kelsey, R.G.; Negrón, J.F.; Seybold, S.J. 2010. Climate change and bark beetles of the western United States and Canada: direct and indirect effects. *BioScience* 60:602–613.
- Bergeron, Y.; Cyr, D.; Girardin, M.P.; Carcaillet, C. 2010. Will climate change drive 21st century burn rates in Canadian boreal forest outside of its natural variability: collating global climate model experiments with sedimentary charcoal data. *Int. J. Wildland Fire* 19:1127–1139.
- Bernier, P.Y.; Bartlett, P.; Black, T.A.; Barr, A.; Kljun, N.; McCaughey, J.H. 2006. Drought constraints on transpiration and canopy conductance in mature aspen and jack pine stands. *Agric. For. Meteorol.* 140:64–78.
- Berteaux, D.; Humphries, M.M.; Krebs, C.J.; Lima, M.; McAdam, A.G.; Pettoelli, N.; Réale, D.; Saitoh, T.; Tkadlec, E.; Weladji, R.B.; Stenseth, N.C. 2006. Constraints to projecting the effects of climate change on mammals. *Clim. Res.* 32:151–158.
- Berteaux, D.; Stenseth, N.C. 2006. Measuring, understanding and projecting the effects of large-scale climatic variability on mammals. *Clim. Res.* 32:95–97.
- Binkley, D. 2004. A hypothesis about the interaction of tree dominance and stand production through stand development. *For. Ecol. Manag.* 190:265–271.
- Biodivcanada. 2012. Enquête sur l'importance de la nature pour les Canadiens. <http://www.biodivcanada.ca/default.asp?lang=Fr&n=24D8B61F-1>. [Consulté en juillet 2013]

- Blankinship, J.; Niklaus, P.; Hungate, B. 2011. A meta-analysis of responses of soil biota to global change. *Oecologia* 165:553–565.
- Bogdanski, B.E.C. 2008. Canada's boreal forest economy: economic and socio-economic issues and research opportunities. Natural Resources Canada, Canadian Forest Service, Pacific Forestry Centre, Victoria, BC. Inf. Rep. BC-X-414. 59 p.
- Boisvenue, C.; Running, S.W. 2006. Impacts of climate change on natural forest productivity – evidence since the middle of the 20th century. *Glob. Change Biol.* 12:862–882.
- Bolch, T.; Menounos, B.; Wheate, R. 2010. Landsat-based inventory of glaciers in western Canada, 1985–2005. *Remote Sens. Environ.* 114:127–137.
- Bonan, G.B. 2008. Forests and climate change: forcings, feedbacks, and the climate benefits of forests. *Science* 320:1444–1449.
- Bonan, G.B.; Van Cleve, K. 1991. Soil temperature, nitrogen mineralization, and carbon source-sink relationships in boreal forests. *Can. J. For. Res.* 22:629–639.
- Bourque, C.P.-A.; Cox, R.M.; Allen, D.J.; Arp, P.A.; Meng, F.R. 2005. Spatial extent of winter thaw events in eastern North America: historical weather records in relation to yellow birch decline. *Glob. Change Biol.* 11:1477–1492.
- Bourque, C.P.-A.; Hassan, Q.K. 2008. Projected impacts of climate change on species distribution in the Acadian forest region of eastern Nova Scotia. *For. Chron.* 84:553–557.
- Bourque, C.P.-A.; Hassan, Q.K.; Swift, D.E. 2010. Modelled potential species distribution for current and projected future climates for the Acadian forest region of Nova Scotia. Nova Scotia Department of Natural Resources, Truro, NS.
- Brady, N.C.; Weil, R.R. 1999. The nature and properties of soils, 14th ed. Prentice-Hall, Upper Saddle River, NY. 980 p.
- Brooks, R.T. 2009. Potential impacts of global climate change on the hydrology and ecology of ephemeral freshwater systems of the forests of the northeastern United States. *Clim. Change* 95:469–483.
- Bruce, J.P. 2003. Implications of climate change for flood damage reduction in Canada. Pages 29–34 in *Proceedings of the 3rd Canadian Conference on Geotechnique and Natural Hazards*, Edmonton, AB, 9–10 June 2003. Canadian Geotechnical Society, Edmonton, AB.
- Burdge, R.J. 2008. The focus of impact assessment (and IAIA [International Association for Impact Assessment]) must now shift to global climate change!! *Environ. Impact Assess.* 28:618–622.
- Burger, M. 1998. Physiological mechanisms limiting the northern boundary of the winter range of the Northern Cardinal (*Cardinalis cardinalis*). Ph.D. thesis, University of Michigan, Ann Arbor, MI.
- Burrows, M.T.; Schoeman, D.S.; Buckley, L.B.; Moore, P.; Poloczanska, E.S.; Brander, K.M.; Brown, C.; Bruno, J.F.; Duarte, C.M.; Halpern, B.S.; Holding, J.; Kappel, C.V.; Kiessling, W.; O'Connor, M.I.; Pandolfi, J.M.; Parmesan, C.; Schwing, F.B.; Sydeman, W.J.; Richardson, A.J. 2011. The pace of shifting climate in marine and terrestrial ecosystems. *Science* 334:652–655.
- Caccianiga, M.; Payette, S. 2006. Recent advance of white spruce (*Picea glauca*) in the coastal tundra of the eastern shore of Hudson Bay (Québec, Canada). *J. Biogeogr.* 33:2120–2135.
- Catto, N. 2010. A review of academic literature related to climate change impacts and adaptation in Newfoundland and Labrador. Department of Geography, Memorial University, St. John's, NL. 124 p.
- Centre for Indigenous Environmental Resources. 2009. Climate risks and adaptive capacity in Aboriginal communities: an assessment south of 60 degrees latitude. Centre for Indigenous Environmental Resources Inc., Winnipeg, MB. 83 p.
- Chen, W.J.; Chen, M.; Price, D.T.; Cihlar, J. 2002. Effects of stand age on net primary productivity of boreal black spruce forests in Ontario, Canada. *Can. J. For. Res.* 32:833–842.
- Chuine, I. 2010. Why does phenology drive species distribution? *Philos. Trans. R. Soc. Biol. Sci.* 365:3149–3160.
- Chuine, I.; Beaubien, E.G. 2001. Phenology is a major determinant of tree species range. *Ecol. Lett.* 4:500–510.
- Clark, A.L.; St. Clair, S.B. 2011. Mycorrhizas and secondary succession in aspen–conifer forests: light limitation differentially affects a dominant early and late successional species. *For. Ecol. Manag.* 262:203–207.
- Cleland, E.E.; Allen, J.M.; Crimmins, T.M.; Dunne, J.A.; Pau, S.; Travers, S.E.; Zavaleta, E.S.; Wolkovich, E.M. 2012. Phenological tracking enables positive species responses to climate change. *Ecology* 93:1765–1771.
- Cleland, E.E.; Chuine, I.; Menzel, A.; Mooney, H.A.; Schwartz, M.D. 2007. Shifting plant phenology in response to global change. *Trends Ecol. Evol.* 22:357–365.
- Coops, N.C.; Waring, R.H. 2011. A process-based approach to estimate lodgepole pine (*Pinus contorta* Dougl.) distribution in the Pacific Northwest under climate change. *Clim. Change* 105:313–328.
- Corlett, R.T. 2011. Impacts of warming on tropical lowland rainforests. *Trends Ecol. Evol.* 26:606–613.
- Craft, J.; Howlett, M. 2012. Subsystem structures, shifting mandates and policy capacity: assessing Canada's ability to adapt to climate change. *Can. Polit. Sci. Rev.* 6:3–14.
- Dale, V.H.; Beyeler, S.C. 2001. Challenges in the development and use of ecological indicators. *Ecol. Indic.* 1:3–10.
- Dale, V.H.; Joyce, L.A.; McNulty, S.; Neilson, R.P.; Ayres, M.P.; Flannigan, M.D.; Hanson, P.J.; Irland, L.C.; Lugo, A.E.; Peterson, C.J.; Simberloff, D.; Swanson, F.J.; Stocks, B.J.; Michael Wotton, B. 2001. Climate change and forest disturbances. *BioScience* 51:723–734.
- Daly, C.; Gibson, W.P.; Taylor, G.H.; Johnson, G.L.; Pasteris, P. 2002. A knowledge-based approach to the statistical mapping of climate. *Clim. Res.* 22:99–113.
- Davidson, D.J. 2010. The applicability of the concept of resilience to social systems: some sources of optimism and nagging doubts. *Soc. Nat. Resour.* 23:1135–1149.

- Davidson, D.J.; Williamson, T.; Parkins, J.R. 2003. Understanding climate change risk and vulnerability in northern forest-based communities. *Can. J. For. Resour.* 33:2252–2261.
- Davidson, E.A.; Janssens, I.A.; Luo, Y. 2006. On the variability of respiration in terrestrial ecosystems: moving beyond Q10. *Glob. Change Biol.* 12:154–164.
- de Chantal, M.; Rita, H.; Bergsten, U.; Löfvenius, M.O.; Grip, H. 2009. Frost heaving of *Picea abies* seedlings as influenced by soil preparation, planting technique, and location along gap-shelterwood gradients. *Silva Fenn.* 43:39–50.
- De Grandpré, L.; Archambault, L.; Morissette, J.L. 2000. Early understory successional changes following clearcutting in the balsam fir-yellow birch forest. *Écoscience* 7:92–100.
- Delcourt, H.R.; Delcourt, P.A. 1988. Quaternary landscape ecology: Relevant scales in space and time. *Landsc. Ecol.* 1:23–44.
- Dickinson, J.L.; Shirk, J.; Bonter, D.; Bonney, R.; Crain, R.L.; Martin, J.; Phillips, T.; Purcell, K. 2012. The current state of citizen science as a tool for ecological research and public engagement. *Front. Ecol. Environ.* 10:291–297.
- Doak, S.C.; Kusel, J. 1996. Well-being in forest-dependent communities, Part II: A social assessment focus. Pages 375–401 in *Sierra Nevada Ecosystem Project: Final Report to Congress, Volume II, Assessments and scientific basis for management options*. University of California, Centers for Water and Wildland Resources, Davis, CA.
- Doelle, M.; Henschell, C.; Smith, J.; Tollefson, C.; Wellstead, A. 2012. New governance arrangements at the intersection of climate change and forest policy: institutional, political and regulatory dimensions. *Emerald Manag. Rev.* 90:37–55.
- Donoghue, E.M.; Sturtevant, V.E. 2007. Social science constructs in ecosystem assessments: revisiting community capacity and community resiliency. *Soc. Nat. Resour.* 20:899–912.
- Dhont, C.; Sylvestre, P.; Gros-Louis, M.-C.; Isabel, N. 2010. Guide-terrain pour l'identification des stades de débourrement et de formation du bourgeon apical chez l'épinette. *Ressources naturelles Canada, Service canadien des forêts, Centre de foresterie des Laurentides, Québec, QC* <http://scf.rncan.gc.ca/publications?id=32086>. [Consulté en septembre 2013]
- Drake, J.E.; Davis, S.C.; Raetz, L.M.; DeLucia, E.H. 2011. Mechanisms of age-related changes in forest production: the influence of physiological and successional changes. *Glob. Change Biol.* 17:1522–1535.
- Duguay, C.R.; Prowse, T.D.; Bonsal, B.R.; Brown, R.D.; Lacroix, M.P.; Ménard, P. 2006. Recent trends in Canadian lake ice cover. *Hydrol. Process.* 20:781–801.
- Easterling, D.R.; Meehl, G.A.; Parmesan, C.; Changnon, S.A.; Karl, T.R.; Mearns, L.O. 2000. Climate extremes: observations, modeling, and impacts. *Science* 289:2068–2074.
- Edwards, J. 1991. Instruction guide to Forest Insect and Disease Survey general survey form. Forestry Canada, Petawawa National Forestry Institute, Ottawa, ON. 63 p.
- [EEA] European Environment Agency. 2008. Impacts of Europe's changing climate — 2008 indicator-based assessment. Section 5.7 Terrestrial ecosystems and biodiversity. European Environment Agency, Copenhagen. 13 p.
- [EEA] European Environment Agency. 2010. 10 messages for 2010: climate change and biodiversity. European Environment Agency, Copenhagen. 12 p.
- Elith, J.; Leathwick, J.R. 2009. Species distribution models: ecological explanation and prediction across space and time. *Annu. Rev. Ecol. Evol. Syst.* 40:677–697.
- Emmett, B.A.; Beier, C.; Estiarte, M.; Tietema, A.; Kristensen, H.L.; Williams, D.; Peñuelas, J.; Schmidt, I.; Sowerby, A. 2004. The response of soil processes to climate change: results from manipulation studies of shrublands across an environmental gradient. *Ecosystems* 7:625–637.
- Engler, R.; Guisan, A. 2009. MigClim: predicting plant distribution and dispersal in a changing climate. *Divers. Distrib.* 15:590–601.
- Environnement Canada. 2011. Perspectives historiques de la température et des précipitations : année 2010. Environnement Canada. Bulletin des tendances et des variations climatiques. <http://www.ec.gc.ca/adsc-cmda/default.asp?lang=Fr&n=77842065-1>. [Consulté en août 2013]
- Fan, Y.; van den Dool, H. 2004. Climate Prediction Center global monthly soil moisture data set at 0.5° resolution for 1948 to present. *J. Geophys. Res.* 109:D10102.
- [FAO] Food and Agriculture Organization of the United Nations. 2011. Framework for assessing and monitoring forest governance. FAO, Rome. 36 p.
- Fierer, N.; Schimel, J.P. 2002. Effects of drying–rewetting frequency on soil carbon and nitrogen transformations. *Soil Biol. Biochem.* 34:777–787.
- Flannigan, M.D.; Logan, K.A.; Amiro, B.D.; Skinner, W.R.; Stocks, B.J. 2005. Future area burned in Canada. *Clim. Change* 72:1–16.
- Fleming, R.A.; Candau, J.N.; McAlpine, R.S. 2002. Landscape-scale analysis of interactions between insect defoliation and forest fire in Central Canada. *Clim. Change* 55:251–272.
- Flinn, K.M.; Vellend, M. 2005. Recovery of forest plant communities in post-agricultural landscapes. *Front. Ecol. Environ.* 3:243–250.
- Flint, C.G.; McFarlane, B.; Müller, M. 2009. Human dimensions of forest disturbance by insects: an international synthesis. *Environ. Manag.* 43:1174–1186.
- Forrest, J.; Inouye, D.W.; Thomson, J.D. 2010. Flowering phenology in subalpine meadows: does climate variation influence community co-flowering patterns? *Ecology* 91:431–440.
- Freudenburg, W.R. 1992. Addictive economies: extractive industries and vulnerable localities in a changing world economy. *Rural Sociol.* 57:305–332.
- Fridley, J.D. 2012. Extended leaf phenology and the autumn niche in deciduous forest invasions. *Nature* 485:359–362.

- Gavin, D.G.; Hallett, D.J.; Hu, F.S.; Lertzman, K.P.; Prichard, S.J.; Brown, K.J.; Lynch, J.A.; Bartlein, P.; Peterson, D.L. 2007. Forest fire and climate change in western North America: insights from sediment charcoal records. *Front. Ecol. Environ.* 5:499–506.
- Geertsema, M.; Egginton, V.N.; Schwab, J.W.; Clague, J.J. 2007. Landslides and historic climate in northern British Columbia. Pages 9–16 in R. McInnes, J. Jakeways, H. Fairbank, and E. Mathie, eds. *Landslides and climate change — challenges and solutions*. Proceedings of the International Conference on Landslides and Climate Change, Ventor, Isle of Wight, UK, 21–24 May 2007. Taylor & Francis Group, London.
- Gillis, M.D.; Pick, R.D.; Leckie, D.G. 1990. Satellite imagery assists in the assessment of hail damage for salvage harvest. *For. Chron.* 66:463–468.
- Girard, F.; Vennetier, M.; Guibal, F.; Corona, C.; Ouramim, S.; Herrero, A. 2011a. *Pinus halepensis* Mill. crown development and fruiting declined with repeated drought in Mediterranean France. *Eur. J. For. Res.* 131:919–931.
- Girard, F.; Vennetier, M.; Ouarmim, S.; Caraglio, Y.; Misson, L. 2011b. Polycyclism, a fundamental tree growth process, decline with recent climate change: the example of *Pinus halepensis* Mill. in Mediterranean France. *Trees* 25:311–322.
- Girardin, M.P.; Guo, X.J.; Bernier, P.Y.; Raulier, F.; Gauthier, S. 2012. Changes in growth of pristine boreal North American forests from 1950 to 2005 driven by landscape demographics and species traits. *Biogeosciences* 9:1021–1053.
- Girardin, M.P.; Mudelsee, M. 2008. Past and future changes in Canadian boreal wildfire activity. *Ecol. Appl.* 18:391–406.
- Girardin, M.P.; Tardif, J.C.; Epp, B.; Conciatori, F. 2009. Frequency of cool summers in interior North America over the past three centuries. *Geophys. Res. Lett.* 36:L07705.
- Glück, P.; Rayner, J.; Berghäll, O.; Braatz, S.; Robledo, C.; Wreford, A. 2009. Governance and policies for adaptation. Pages 187–210 in R. Seppälä, A. Buck, and P. Katila, eds. *Adaptation of forests and people to climate change: a global assessment report*. IUFRO World Series Vol. 22, International Union of Forest Research Organizations, Helsinki, Finland. 224 p.
- Göttlicher, S.G.; Steinmann, K.; Betson, N.R.; Högberg, P. 2006. The dependence of soil microbial activity on recent photosynthate from trees. *Plant Soil* 287:85–94.
- Gottschalk, P.; Smith, J.U.; Wattenbach, M.; Bellarby, J.; Stehfest, E.; Arnell, N.; Osborn, T.J.; Smith, P. 2012. How will organic carbon stocks in mineral soils evolve under future climate? Global projections using RothC for a range of climate change scenarios. *Biogeosci. Discuss.* 9:411–451.
- Govind, A.; Chen, J.M.; McDonnell, J.; Kumari, J.; Sonnentag, O. 2011. Effects of lateral hydrological processes on photosynthesis and evapotranspiration in a boreal ecosystem. *Ecophysiology* 4:394–410.
- Gu, L.; Hanson, P.J.; Post, W.M.; Kaiser, D.P.; Yang, B.; Nemani, R.; Pallardy, S.G.; Meyers, T. 2008. The 2007 eastern US spring freeze: increased cold damage in a warming world? *BioScience* 58:253–262.
- Gudmundsson, H. 2003. The policy use of environmental indicators – learning from evaluation research. *J. Transdiscipl. Environ. Stud.* 2:1–12.
- Hadley, K.S.; Veblen, T.T. 1993. Stand response to western spruce budworm and Douglas-fir bark beetle outbreaks, Colorado Front Range. *Can. J. For. Res.* 23:479–491.
- Hamann, A.; Wang, T. 2006. Potential effects of climate change on ecosystem and tree species distribution in British Columbia. *Ecology* 87:2773–2786.
- Harrison, S.; Damschen, E.; Grace, J.B. 2010. Ecological contingency in the effects of climatic warming on forest herb communities. *Proc. Natl Acad Sci. USA* 107:19362–19367.
- Harshaw, H.W.; Sheppard, S.R.J.; Lewis, J.L. 2007. A review and synthesis of social indicators for sustainable forest management. *BC J. Ecosyst. Manag.* 8:17–36.
- Haughian, S.R.; Burton, P.J.; Taylor, S.W.; Curry, C.L. 2012. Expected effects of climate change on forest disturbance regimes in British Columbia. *BC J. Ecosyst. Manag.* 13:1–24.
- Hember, R.A.; Kurz, W.A.; Metsaranta, J.M.; Black, T.A.; Guy, R.D.; Coops, N.C. 2012. Accelerating regrowth of temperate-maritime forests due to environmental change. *Glob. Change Biol.* 18:2026–2040.
- Hennon, P.E.; D'Amore, D.V.; Zeglen, S.; Grainger, M. 2005. Yellow-cedar decline in the North Coast Forest District of British Columbia. *Res. Note PNW-RN-549*. USDA For. Serv., Pacific Northwest Res. Stn., Portland, OR. 16 p.
- Hoffer, M.; Tardif, J.C. 2009. False rings in jack pine and black spruce trees from eastern Manitoba as indicators of dry summers. *Can. J. For. Res.* 39:1722–1736.
- Hogg, E.H. 1997. Temporal scaling of moisture and the forest-grassland boundary in western Canada. *Agric. For. Meteorol.* 84:115–122.
- Hogg, E.H.; Barr, A.G.; Black, T.A. 2013. A simple soil moisture index for representing multi-year drought impacts on aspen productivity in the western Canadian Interior. *Agric. For. Meteorol.* 178–179:173–182.
- Hogg, E.H.; Brandt, J.P.; Kochtubajda, B. 2002a. Growth and dieback of aspen forests in northwestern Alberta, Canada, in relation to climate and insects. *Can. J. For. Res.* 32:823–832.
- Hogg, E.H.; Brandt, J.P.; Michaelian, M. 2008. Impacts of a regional drought on the productivity, dieback, and biomass of western Canadian aspen forests. *Can. J. For. Res.* 38:1373–1384.
- Hogg, E.H.; Hart, M.; Lieffers, V.J. 2002b. White tree rings formed in trembling aspen saplings following experimental defoliation. *Can. J. For. Res.* 32:1929–1934.
- Hogg, E.H.; Schwarz, A.G. 1997. Regeneration of planted conifers across climatic moisture gradients on the Canadian prairies: implications for distribution and climate change. *J. Biogeogr.* 24:527–534.

- Hopkin, A.; Williams, T.; Sajan, R.; Pedlar, J.; Nielsen, C. 2003. Ice storm damage to eastern Ontario forests: 1998–2001. *For. Chron.* 79:47–53.
- Houle, G. 2007. Spring-flowering herbaceous plant species of the deciduous forests of eastern Canada and 20th century climate warming. *Can. J. For. Res.* 37:505–512.
- Hunt, L.M.; Kolman, B. 2012. Répercussions sociales particulières des changements climatiques dans l'écorégion 3E-1 de l'Ontario (ceinture d'argile). Division des ressources scientifiques et informationnelles, ministère des Richesses naturelles de l'Ontario, Sault Ste. Marie, ON.
- Innes, J.; Joyce, L.A.; Kellomäki, S.; Louman, B.; Ogden, A.; Parrotta, J.; Thompson, I.; Ayres, M.; Ong, C.; Santos, H.; Sohngen, B.; Wreford, A. 2009. Management for adaptation. Pages 135–185 in R. Seppälä, A. Buck, and P. Katila, eds. *Adaptation of forests and people to climate change: a global assessment report*. IUFRO World Series Vol. 22, International Union of Forest Research Organizations, Helsinki, Finland. 224 p.
- Inouye, D.W. 2008. Effects of climate change on phenology, frost damage, and floral abundance of montane wildflowers. *Ecology* 89:353–362.
- [IPCC] Intergovernmental Panel on Climate Change. 2001. *Climate change 2001: the scientific basis*. Contribution of Working Group I to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press, Cambridge, UK. 881 p.
- [IPCC] Intergovernmental Panel on Climate Change. 2007. *Climate change 2007: the physical science basis*. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press, Cambridge, UK. 996 p.
- Jasinski, J.P.P.; Payette, S. 2005. The creation of alternative stable states in the southern boreal forest, Québec, Canada. *Ecol. Monogr.* 75:561–583.
- Jepsen, J.U.; Kapari, L.; Hagen, S.B.; Schott, T.; Vindstad, O.P.L.; Nilssen, A.C.; Ims, R.A. 2011. Rapid northwards expansion of a forest insect pest attributed to spring phenology matching with sub-Arctic birch. *Glob. Change Biol.* 17:2071–2083.
- Johnston, M.; Campagna, M.; Gray, P.; Kope, H.; Loo, J.; Ogden, A.; O'Neill, G.A.; Price, D.; Williamson, T. 2009. *Vulnérabilité des arbres du Canada aux changements climatiques et propositions de mesures visant leur adaptation : un aperçu destiné aux décideurs et aux intervenants du monde forestier*. Conseil canadien des ministres des forêts, Ottawa, ON. 52 p.
- Johnstone, J.F.; Chapin, F.S.; Hollingsworth, T.N.; Mack, M.C.; Romanovsky, V.; Turetsky, M. 2010. Fire, climate change, and forest resilience in interior Alaska. *Can. J. For. Res.* 40:1302–1312.
- Johnstone, J.F.; McIntire, E.J.B.; Pedersen, E.J.; King, G.; Pisaric, M.J.F. 2011. A sensitive slope: estimating landscape patterns of forest resilience in a changing climate. *Ecosphere* 1:1–21.
- Jones, P.D.; Lister, D.H.; Osborn, T.J.; Harpham, C.; Salmon, M.; Morice, C.P. 2012. Hemispheric and large-scale land surface air temperature variations: an extensive revision and an update to 2010. *J. Geophys. Res.* 117; doi:10.1029/2011JD017139.
- Jonzen, N.; Ergon, T.; Linden, A.; Stenseth, N.C. 2007. Bird migration and climate: the general picture and beyond. *Clim. Res.* 35:177–180.
- Kenney, M.A.; Chen, R.S.; Maldonado, J.; Quattrochi, D. 2011. Part 1: Workshop report – summary of presentations and discussions. Pages 1–39 in *NCA Report Series, Volume 4c, Climate Change Impacts and Responses: Societal Indicators for the National Climate Assessment*. Workshop held in Washington, DC, 28–29 April 2011. National Climate Assessment, Washington, DC. 143 p.
- Kessel, B.; Gibson, D.D. 1994. A century of avifaunal change in Alaska. *Stud. Avian Biol.* 15:4–13.
- Kharin, V.V.; Zwiers, F.W.; Zhang, X.; Hegerl, G.C. 2007. Changes in temperature and precipitation extremes in the IPCC ensemble of global coupled model simulations. *J. Clim.* 20:1419–1444.
- Kimmel, E. 2009. *Climate change adaptation and biodiversity: background report*. Adaptation to Climate Change Team. Simon Fraser University, Burnaby, BC.
- Kimmins, J.P. 2003. *Forest Ecology*. Addison Wesley Longman Inc., Upper Saddle River, NJ. 720 p.
- Kirilenko, A.P.; Sedjo, R.A. 2007. Climate change impacts on forestry. *Proc. Natl Acad. Sci. USA* 104:19697–19702.
- Kirk, J.L.; Beaudette, L.A.; Hart, M.; Moutoglou, P.; Klironomos, J.N.; Lee, H.; Trevors, J.T. 2004. Methods of studying soil microbial diversity. *J. Microbiol. Methods* 58:169–188.
- Klein, R.J.T.; Schipper, E.L.F.; Dessai, S. 2005. Integrating mitigation and adaptation into climate and development policy: three research questions. *Environ. Sci. Policy* 8:579–588.
- Klenk, N. 2012. *Climate change and the FSC Canadian Maritimes Standard: a literature review of proposed climate change strategies in forestry and an analysis of their consistency with FSC principles and criteria*. The Forest Collaborative Project at the University of New Brunswick, Fredericton, NB. 49 p.
- Kliejunas, J.T.; Geils, B.W.; Glaeser, J.M.; Goheen, E.M.; Hennon, P.; Kim, M.-S.; Kope, H.; Stone, J.; Sturrock, R.; Frankel, S.J. 2009. Review of literature on climate change and forest diseases of western North America. USDA For. Serv., Pacific Southwest Res. Stn., Albany, CA. 54 p.
- Körner, C. 1993. Scaling from species to vegetation: the usefulness of functional groups. Pages 117–140 in E.-D. Schulze and H.A. Mooney, eds. *Biodiversity and ecosystem function*. Springer-Verlag, Berlin.
- Kozłowski, T.T. 1986. Soil aeration and growth of forest trees. *Scand. J. For. Res.* 1:113–123.
- Kremsater, L. 2012. *Scan of climate change indicators relevant to forests and forestry*. Report prepared on contract for Natural Resources Canada. Natural Resources Canada,

- Canadian Forest Service, Pacific Forestry Centre, Victoria, BC. Unpublished report available on request from pfcpublications@nrcan-rncan.gc.ca.
- Kusel, J. 2001. Assessing well-being in forest-dependent communities. *J. Sus. For.* 13:359–384.
- Lal, R. 2004. Soil carbon sequestration to mitigate climate change. *Geoderma* 123:1–22.
- Landres, P.B.; Verner, J.; Thomas, J.W. 1988. Ecological uses of vertebrate indicator species: a critique. *Conserv. Biol.* 2:316–328.
- Lapointe, L. 2001. How phenology influences physiology in deciduous forest spring ephemerals. *Physiol. Plant.* 113:151–157.
- Latifovic, R.; Pouliot, D. 2007. Analysis of climate change impacts on lake ice phenology in Canada using the historical satellite data record. *Remote Sens. Environ.* 106:492–507.
- Lavergne, S.; Mouquet, N.; Thuiller, W.; Ronce, O. 2010. Biodiversity and climate change: integrating evolutionary and ecological responses of species and communities. *Annu. Rev. Ecol. Evol. Syst.* 41:321–350.
- Lawler, J.J.; Tear, T.H.; Pyke, C.; Shaw, M.R.; Gonzalez, P.; Kareiva, P.; Hansen, L.; Hannah, L.; Klausmeyer, K.; Aldous, A.; Bienz, C.; Pearsall, S. 2010. Resource management in a changing and uncertain climate. *Front. Ecol. Environ.* 8:35–43.
- Lemieux, C.J.; Beechey, T.J.; Scott, D.J.; Gray, P.A. 2010. Protected areas and climate change in Canada: challenges and opportunities for adaptation. Canadian Council on Ecological Areas, Ottawa, ON. 170 p.
- Lemprière, T.C.; Bernier, P.Y.; Carroll, A.L.; Flannigan, M.D.; Gilsenan, R.P.; McKenney, D.W.; Hogg, E.H.; Pedlar, J.H.; Blain, D. 2008. L'importance d'adapter le secteur forestier aux changements climatiques. Ressources naturelles Canada, Service canadien des forêts, Centre de foresterie du Nord, Edmonton, AB. Rapp. Inf. NOR-X-416F. 88 p.
- Lescop-Sinclair, K.; Payette, S. 1995. Recent advance of the Arctic treeline along the eastern coast of Hudson Bay. *J. Ecol.* 83:929–936.
- Lonsdale, D.; Gibbs, J.N. 1996. Effects of climate change on fungal diseases of trees. Pages 1–19 in J.C. Frankland, N. Magan, and G.M. Gadd, eds. *Fungi and environmental change*. Cambridge University Press, Cambridge, UK.
- Lowther, L. 2010. Assessment of climate change and impacts of *Armillaria* root disease (*Armillaria* spp.) in Alberta's boreal forest. Royal Roads University, Victoria, BC. 65 p.
- Lynn, K.; MacKendrick, K.; Donoghue, E.M. 2011. Social vulnerability and climate change: synthesis of literature. USDA For. Serv., Pacific Northwest Res. Stn., Portland, OR. 70 p.
- Ma, Z.; Peng, C.; Zhu, Q.; Chen, H.; Yu, G.; Li, W.; Zhou, X.; Wang, W.; Zhang, W. 2012. Regional drought-induced reduction in the biomass carbon sink of Canada's boreal forests. *Proc. Natl Acad. Sci.* 109:2423–2427.
- MacDonald, N.W.; Zak, D.R.; Pregitzer, K.S. 1995. Temperature effects on kinetics of microbial respiration and net nitrogen and sulfur mineralization. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 59:223–240.
- MacKendrick, N.; Parkins, J. 2005. Social dimension of community vulnerability to mountain pine beetle. Natural Resources Canada, Canadian Forest Service, Pacific Forestry Centre, Victoria, BC.
- Malanson, G.T.; Butler, D.R.; Fagre, D.B.; Walsh, S.; Tomback, D.F.; Daniels, L.D.; Resler, L.M.; Smith, W.K.; Weiss, D.; Peterson, D.L.; Bunn, A.C.; Hiemstra, C.A.; Liptzin, D.; Bourgeron, P.S.; Shen, Z.; Millar, C.I. 2007. Alpine treeline of western North America: linking organism-to-landscape dynamics. *Phys. Geogr.* 28:378–396.
- Manomet Center for Conservation Sciences. 2010. Climate change and Massachusetts fish and wildlife: Volume 2, Habitat and species vulnerability. Manomet Center for Conservation Sciences and Massachusetts Division of Fisheries and Wildlife. Plymouth, MA. 59 p.
- McCool, S.F. 2003. Managing natural disturbances and sustaining human communities: implications of ecosystem-based management of public lands. Pages 127–143 in L.E. Kruger, tech. ed. *Understanding community-forest relations*. USDA For. Serv., Pacific Northwest Res. Stn., Portland, OR.
- McFarlane, B.L.; Parkins, J.R.; Watson, D.O.T. 2012. Risk, knowledge, and trust in managing forest insect disturbance. *Can. J. For. Res.* 42:710–719.
- McHale, P.J.; Mitchell, M.J.; Bowles, F.P. 1998. Soil warming in a northern hardwood forest: trace gas fluxes and leaf litter decomposition. *Can. J. For. Res.* 28:1365–1372.
- McKenney, D.W.; Pedlar, J.H.; Lawrence, K.; Campbell, K.; Hutchinson, M.F. 2007a. Beyond traditional hardiness zones: using climate envelopes to map plant range limits. *BioScience* 57:929–937.
- McKenney, D.W.; Pedlar, J.H.; Lawrence, K.; Campbell, K.; Hutchinson, M.F. 2007b. Potential impacts of climate change on the distribution of North American trees. *BioScience* 57:939–948.
- McKenney, D.W.; Pedlar, J.H.; Papadopol, P.; Hutchinson, M.F. 2006. The development of 1901–2000 historical monthly climate models for Canada and the United States. *Agric. For. Meteorol.* 138:69–81.
- McKenzie, D.; Peterson, D.L.; Littell, J.J. 2009. Global Warming and Stress Complexes in Forests of Western North America. Pages 319–337 in A. Bytnerowicz, M. Arbaugh, A. Riebau, and C. Andersen, eds. *Developments in Environmental Science* 8. Elsevier, Amsterdam.
- McManus, K.M.; Morton, D.C.; Masek, J.G.; Wang, D.; Sexton, J.O.; Nagol, J.R.; Ropars, P.; Boudreau, S. 2012. Satellite-based evidence for shrub and graminoid tundra expansion in northern Quebec from 1986 to 2010. *Glob. Change Biol.* 18:2313–2323.

- Meier, E.S.; Lischke, H.; Schmatz, D.R.; Zimmermann, N.E. 2012. Climate, competition and connectivity affect future migration and ranges of European trees. *Glob. Ecol. Biogeogr.* 21:164–178.
- Mekis, É.; Vincent, L.A. 2011. An overview of the second generation adjusted daily precipitation dataset for trend analysis in Canada. *Atmosphere-Ocean* 49:163–177.
- Melillo, J.M.; McGuire, A.D.; Kicklighter, D.W.; Moore, B.; Vorosmarty, C.J.; Schloss, A.L. 1993. Global climate change and terrestrial net primary production. *Nature* 363:234–240.
- Mendis, S.; Mills, S.; Yantz, J. 2003. Building community capacity to adapt to climate change in resource-based communities. Prince Albert Model Forest, Prince Albert, SK. 90 p.
- Menzel, A. et al. 2006. European phenological response to climate change matches the warming pattern. *Glob. Change Biol.* 12:1969–1976.
- Meunier, C.; Sirois, L.; Bégin, Y. 2007. Climate and *Picea mariana* seed maturation relationships: a multi-scale perspective. *Ecol. Monogr.* 77:361–376.
- Meyn, A.; Schmidlein, S.; Taylor, S.W.; Girardin, M.P.; Thonicke, K.; Cramer, W. 2010. Spatial variation of trends in wildfire and summer drought in British Columbia, Canada, 1920–2000. *Int. J. Wildland Fire* 19:272–283.
- Michaelian, M.; Hogg, E.H.; Hall, R.J.; Arsenault, E. 2011. Massive mortality of aspen following severe drought along the southern edge of the Canadian boreal forest. *Glob. Change Biol.* 17:2084–2094.
- Michalos, A.; Smale, B.; Labonté, R.; Muhajarine, N.; Scott, K.; Guhn, M.; Gadermann, A.M.; Zumbo, B.D.; Morgan, A.; Swystun, L.; Holden, B.; Bernardin, H.; Dunning, B.; Graham, P.; Brooker, A.-S.; Hyman, I. 2011. The Canadian index of wellbeing. Technical Report 1.0. Canadian Index of Wellbeing and University of Waterloo, Waterloo, ON. 80 p.
- Millar, C.I.; Stephenson, N.; Stephens, S.L. 2007. Climate change and forests of the future: managing in the face of uncertainty. *Ecol. Appl.* 17:2145–2151.
- Miller-Rushing, A.J.; Primack, R.B. 2008. Global warming and flowering times in Thoreau's concord: a community perspective. *Ecology* 89:332–341.
- Mitchell, R.E.; Parkins, J.R. 2011. The challenge of developing social indicators for cumulative effects assessment and land use planning. *Ecol. Soc.* 16:29.
- Monson, R.K.; Lipson, D.L.; Burns, S.P.; Turnipseed, A.A.; Delany, A.C.; Williams, M.W.; Schmidt, S.K. 2006. Winter forest soil respiration controlled by climate and microbial community composition. *Nature* 439:711–714.
- Moore, R.D.; Fleming, S.W.; Menounos, B.; Wheate, R.; Fountain, A.; Stahl, K.; Holm, K.; Jakob, M. 2009. Glacier change in western North America: influences on hydrology, geomorphic hazards and water quality. *Hydrol. Process.* 23:42–61.
- Morelli, T.L.; Carr, S.C. 2011. A review of the potential effects of climate change on quaking aspen (*Populus tremuloides*) in the Western United States and a new tool for surveying sudden aspen decline. USDA For. Serv., Pacific Southwest Res. Stn., Albany, CA. 31 p.
- Morin, X.; Lechowicz, M.J.; Augspurger, C.; O'Keefe, J.; Viner, D.; Chuine, I. 2009. Leaf phenology in 22 North American tree species during the 21st century. *Glob. Change Biol.* 15:961–975.
- Morisette, J.T.; Richardson, A.D.; Knapp, A.K.; Fisher, J.I.; Graham, E.A.; Abatzoglou, J.; Wilson, B.E.; Breshears, D.D.; Henebry, G.M.; Hanes, J.M.; Liang, L. 2009. Tracking the rhythm of the seasons in the face of global change: phenological research in the 21st century. *Front. Ecol. Environ.* 7:253–260.
- Moss, M.; Hermanutz, L. 2009. Postfire seedling recruitment at the southern limit of lichen woodland. *Can. J. For. Res.* 39:2299–2306.
- Moyer, J.M.; Owen, R.J.; Duinker, P.N. 2008. Forest values: a framework for old-growth forest with implications for other forest conditions. *Open For. Sci. J.* 1:27–36.
- Nadeau, S.; Shindler, B.; Kakoyannis, C. 1999. Forest communities: new frameworks for assessing sustainability. *For. Chron.* 75:747–754.
- Naficy, C.E.; Sala, A.; Keeling, E.G.; Graham, J.; DeLuca, T.H. 2010. Interactive effects of historical logging and fire exclusion on ponderosa pine forest structure in the northern Rockies. *Ecol. Appl.* 20:1851–1864.
- Nealis, V.G.; Cooke, B.J. 2014. Risk assessment of the threat of mountain pine beetle to Canada's boreal and eastern pine forests. Canadian Council of Forest Ministers. Ottawa, ON. 27 p.
- [NEON] National Ecological Observatory Network. 2011. 2011 Science strategy. 55 p. <http://www.neoninc.org/science/sciencestrategy> [Accessed July 2013.]
- New, M.; Hulme, M.; Jones, P. 1999. Representing twentieth-century space-time climate variability. Part I: development of a 1961–90 mean monthly terrestrial. *Am. Meteorol. Soc.* 12:829–856.
- O'Neill, E.G. 1994. Responses of soil biota to elevated atmospheric carbon dioxide. *Plant Soil* 165:55–65.
- Page, W.; Jenkins, M.J. 2007. Predicted fire behavior in selected mountain pine beetle-infested lodgepole pine. *For. Sci.* 53:662–674.
- Paquette, A.; Messier, C. 2011. The effect of biodiversity on tree productivity: from temperate to boreal forests. *Glob. Ecol. Biogeogr.* 20:170–180.
- Parker, T.J.; Clancy, K.M.; Mathiasen, R.L. 2006. Interactions among fire, insects and pathogens in coniferous forests of the interior western United States and Canada. *Agric. For. Entomol.* 8:167–189.
- Parmesan, C. 2006. Ecological and evolutionary responses to recent climate change. *Annu. Rev. Ecol. Evol. Syst.* 37:637–669.

- Parmesan, C. 2007. Influences of species, latitudes and methodologies on estimates of phenological response to global warming. *Glob. Change Biol.* 13:1860–1872.
- Parmesan, C.; Yohe, G. 2003. A globally coherent fingerprint of climate change impacts across natural systems. *Nature* 421:37–42.
- Paul, E.; Clark, F. 1996. *Soil microbiology and biochemistry*, 2nd ed. Academic Press, New York, NY. 273 p.
- Paul, E.A., ed. 2007. *Soil microbiology, ecology and biochemistry*, 3rd ed. Academic Press, Burlington, MA. 552 p.
- Peltola, H.; Kellomäki, S.; Vaisanen, H. 1999. Model computations of the impact of climatic change on the windthrow risk of trees. *Clim. Change* 41:17–36.
- Peng, C.; Ma, Z.; Lei, X.; Zhu, Q.; Chen, H.; Wang, W.; Liu, S.; Li, W.; Fang, X.; Zhou, X. 2011. A drought-induced pervasive increase in tree mortality across Canada's boreal forests. *Nat. Clim. Change* 1:467–471.
- Peñuelas, J.; Rutishauser, T.; Filella, I. 2009. Phenology feedbacks on climate change. *Science* 324:887–888.
- Peterjohn, W.T.; Melillo, J.M.; Bowles, S.T. 1993. Soil warming and trace gas fluxes: experimental design and preliminary flux results. *Oecologia* 93:18–24.
- Peterjohn, W.T.; Melillo, J.M.; Steudler, P.A.; Newkirk, K.M.; Bowles, F.P.; Aber, J.D. 1994. Responses of trace gas fluxes and N availability to experimentally elevated soil temperatures. *Ecol. Appl.* 4:617–625.
- Pounds, J.A. 2001. Climate and amphibian declines. *Nature* 410:639–640.
- Price, D.T.; McKenney, D.W.; Joyce, L.A.; Siltanen, R.M.; Papadopol, P.; Lawrence, K. 2011. High-resolution interpolation of climate scenarios for Canada derived from general circulation model simulations. Natural Resources Canada, Canadian Forest Service, Northern Forestry Centre, Edmonton, AB. 126 p.
- Raffa, K.F.; Aukema, B.H.; Bentz, B.J.; Carroll, A.L.; Hicke, J.A.; Turner, M.G.; Romme, W.H. 2008. Cross-scale drivers of natural disturbances prone to anthropogenic amplification: the dynamics of bark beetle eruptions. *BioScience* 58:501–517.
- Rayner, J. 2012. Shifting mandates and climate change policy capacity: the forestry case. *Can. Polit. Sci. Rev.* 6:75–85.
- Réale, D.; McAdam, A.G.; Boutin, S.; Berteaux, D. 2003. Genetic and plastic responses of a northern mammal to climate change. *Proc. R. Soc. Lond. Ser. B: Biol. Sci.* 270:591–596.
- Régnière, J.; Powell, J.; Bentz, B.; Nealis, V. 2012a. Effects of temperature on development, survival and reproduction of insects: experimental design, data analysis and modeling. *J. Insect Physiol.* 58:634–647.
- Régnière, J.; Saint-Amant, R. 2008. *BioSIM 9 – Guide de l'utilisateur*. Ressources naturelles Canada, Service canadien des forêts, Centre de foresterie des Laurentides, Québec, QC. Rapp. Inf. LAU-X-134F, 82 p.
- Régnière, J.; St-Amant, R.; Duval, P. 2012b. Predicting insect distributions under climate change from physiological responses: spruce budworm as an example. *Biol. Invasions* 14:1571–1586.
- Riley, C.G. 1953. Hail damage in forest stands. *For. Chron.* 29:139–143.
- Robinson, C.H.; Wookey, P.A.; Parsons, A.N.; Potter, J.A.; Callaghan, T.V.; Lee, J.A.; Press, M.C.; Welker, J.M. 1995. Responses of plant litter decomposition and nitrogen mineralisation to simulated environmental change in a high Arctic polar semi-desert and a subarctic dwarf shrub heath. *Oikos* 74:503–512.
- Rodenhouse, N.L.; Christenson, L.M.; Parry, D.; Green, L.E. 2009. Climate change effects on native fauna of northeastern forests. *Can. J. For. Res.* 39:249–263.
- Rodenhuis, D.R.; Bennett, K.E.; Werner, A.T.; Murdock, T.Q.; Bronaugh, D. 2009. Hydro-climatology and future climate impacts in British Columbia. Pacific Climate Impacts Consortium, University of Victoria, Victoria, BC. <http://www.pacificclimate.org/sites/default/files/publications/Rodenhuis.ClimateOverview.Mar2009.pdf> 132 p.
- Root, T. 1988. Environmental factors associated with avian distributional boundaries. *J. Biogeogr.* 15:489–505.
- Roselló-Mora, R.; Amann, R. 2001. The species concept for prokaryotes. *FEMS Microbiol. Rev.* 25:39–67.
- Rosenzweig, C.; Casassa, G.; Karoly, D.J.; Imeson, A.; Liu, C.; Menzel, A.; Rawlins, S.; Root, T.L.; Seguin, B.; Tryjanowski, P. 2007. Assessment of observed changes and responses in natural and managed systems. Pages 79–131 in M.L. Parry, O.F. Canziani, J.P. Palutikof, P.J. van der Linden, and C.E. Hanson, eds. *Climate change 2007: impacts, adaptation and vulnerability. Contribution of Working Group II to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press, Cambridge, UK.
- Rousch, W.M. 2009. A substantial upward shift of the alpine treeline ecotone in the southern Canadian Rocky Mountains. M.Sc. thesis, University of Victoria, Victoria, BC. 164 p.
- Runion, G.B.; Curl, E.A.; Rogers, H.H.; Backman, P.A.; Rodriguez-Kábana, R.; Helms, B.E. 1994. Effects of free-air CO₂ enrichment on microbial populations in the rhizosphere and phyllosphere of cotton. *Agric. For. Meteorol.* 70:117–130.
- Rustad, L.E.; Campbell, J.L.; Marion, G.M.; Norby, R.J.; Mitchell, M.J.; Hartley, A.E.; Cornelissen, J.H.C.; Gurevitch, J.; GCTE-NEWS. 2001. A meta-analysis of the response of soil respiration, net nitrogen mineralization, and aboveground plant growth to experimental ecosystem warming. *Oecologia* 126:543–562.
- Rustad, L.E.; Huntington, T.G.; Boone, R.D. 2000. Controls on soil respiration: implications for climate change. *Biogeochemistry* 48:1–6.
- Safranyik, L.C.; Carroll, A.L.; Régnière, J.; Langor, D.W.; Riel, W.G.; Shore, T.L.; Peter, B.; Cooke, B.J.; Nealis, V.G.; Taylor, S.W. 2010. Potential for range expansion of mountain

- pine beetle into the boreal forest of North America. *Can. Entomol.* 142:415–442.
- Sailor, D.J.; Smith, M.; Hart, M. 2008. Climate change implications for wind power resources in the Northwest United States. *Renew. Energy* 33:2393–2406.
- Sauchyn, D.; Kulshreshtha, S. 2008. *Prairies*. Pages 275–328 in D.S. Lemmen, F.J. Warren, J. Lacroix, and E. Bush, eds. *From Impacts to Adaptation: Canada in a Changing Climate 2007*. Government of Canada, Ottawa, ON. 448 p.
- Schelhaas, M.-J.; Schuck, A.; Varis, S. 2003. Database on forest disturbances in Europe (DFDE) – technical description. Internal Report 14. European Forest Institute, Joensuu, Finland. 44 p.
- Schlessinger, W.H.; Andrews, J.A. 2000. Soil respiration and the global carbon cycle. *Biogeochemistry* 48:7–20.
- Schloss, C.A.; Nuñez, T.A.; Lawler, J.J. 2012. Dispersal will limit ability of mammals to track climate change in the Western Hemisphere. *Proc. Natl. Acad. Sci. USA* 109 (22):8606–8611.
- Schwartz, M.W.; Iverson, L.R.; Prasad, A.M.; Matthews, S.N.; O'Connor, R.J. 2006. Predicting extinctions as a result of climate change. *Ecology* 87:1611–1615.
- Seastedt, T.R.; Bowman, W.D.; Caine, T.N.; McKnight, D.; Townsend, A.; Williams, M.W. 2004. The landscape continuum: a model for high-elevation ecosystems. *BioScience* 54:111–121.
- Sexton, J.P.; McIntyre, P.J.; Angert, A.L.; Rice, K.J. 2009. Evolution and ecology of species range limits. *Annu. Rev. Ecol. Syst.* 40:415–436.
- Shuman, J.K.; Shugart, H.H.; O'Halloran, T.L. 2011. Sensitivity of Siberian larch forests to climate change. *Glob. Change Biol.* 17:2370–2384.
- Simard, M.; Romme, W.H.; Griffin, J.M.; Turner, M.G. 2011. Do mountain pine beetle outbreaks change the probability of active crown fire in lodgepole pine forests? *Ecol. Monogr.* 81:3–24.
- Singer, M.C.; Parmesan, C. 2010. Phenological asynchrony between herbivorous insects and their hosts: signal of climate change or pre-existing adaptive strategy? *Philos. Trans. R. Soc. Biol. Sci.* 365:3161–3176.
- Smith, J.O.; Smith, P.; Wattenbach, M.; Zaehle, S.; Hiederer, R.; Jones, R.J.A.; Montanarella, L.; Rounsevell, M.D.A.; Reginster, I.; Ewert, F. 2005. Projected changes in mineral soil carbon of European croplands and grasslands, 1990–2080. *Glob. Change Biol.* 11:2141–2152.
- Soja, A.J.; Tchepakova, N.M.; French, N.H.F.; Flannigan, M.D.; Shugart, H.H.; Stocks, B.J.; Sukhinin, A.I.; Parfenova, E.I.; Chapin III, F.S.; Stackhouse Jr., P.W. 2007. Climate-induced boreal forest change: predictions versus current observations. *Glob. Planet. Change* 56:274–296.
- Statistique Canada. 2012. L'activité humaine et l'environnement : La gestion des déchets au Canada. Ottawa, ON. <http://www.statcan.gc.ca/pub/16-201-x/16-201-x2012000-fra.pdf> [Consulté en août 2013.]
- Stedman, R.; White, W.; Patriquin, M.; Watson, D. 2007. Measuring community forest-sector dependence: does method matter? *Soc. Nat. Resour.* 20:629–646.
- Stedman, R.C. 2004. Risk and climate change: perceptions of key policy actors in Canada. *Risk Anal.* 24:1395–1406.
- Steenberg, J.W.N.; Duinker, P.N.; Bush, P.G. 2011. Exploring adaptation to climate change in the forests of central Nova Scotia, Canada. *For. Ecol. Manag.* 262:2316–2327.
- Steenberg, J.W.N.; Duinker, P.N.; Van Damme, L.; Zielke, K. 2013. Criteria and indicators of sustainable forest management in a changing climate: an evaluation of Canada's national framework. *J. Sustain. Dev.* 6:32–64.
- Ste-Marie, C.; Nelson, E.A.; Dabros, A.; Bonneau, M.-E. 2011. Assisted migration: introduction to a multifaceted concept. *For. Chron.* 87:724–730.
- Stephens, S.L.; Moghaddas, J.J.; Edminster, C.; Fiedler, C.E.; Haase, S.; Harrington, M.; Keeley, J.E.; Knapp, E.E.; McIver, J.D.; Metlen, K.Y.; Skinner, C.N.; Youngblood, A. 2009. Fire treatment effects on vegetation structure, fuels, and potential fire severity in western US forests. *Ecol. Appl.* 19:305–320.
- Stirling, I.; Derocher, A.E. 2012. Effects of climate warming on polar bears: a review of the evidence. *Glob. Change Biol.* 18:2694–2706.
- Sturrock, R.N.; Frankel, S.J.; Brown, A.V.; Hennon, P.E.; Kliejunas, J.T.; Lewis, K.J.; Woods, A.J. 2011. Climate change and forest diseases. *Plant Pathol.* 60:133–149.
- Sullivan, B.W.; Kolb, T.E.; Hart, S.C.; Kaye, J.P.; Dore, S.; Montes-Helu, M. 2008. Thinning reduces soil carbon dioxide but not methane flux from southwestern USA ponderosa pine forests. *For. Ecol. Manag.* 255:4047–4055.
- Swart, R.; Raes, F. 2007. Making integration of adaptation and mitigation work: mainstreaming into sustainable development policies? *Clim. Policy* 7:288–303.
- Tardif, J.C.; Girardin, M.P.; Conciatori, F. 2011. Light rings as bioindicators of climate change in Interior North America. *Glob. Planet. Change* 79:134–144.
- Taylor, A.R.; Chen, H.Y.H. 2011. Multiple successional pathways of boreal forest stands in central Canada. *Ecography* 34:208–219.
- Teitelbaum, S.; Beckley, T.M.; Nadeau, S.; Southcott, C. 2003. Milltown revisited: strategies for assessing and enhancing forest-dependent community sustainability. Chapter 5. Pages 155–179 in P.J. Burton, C. Messier, D.W. Smith, and W.L. Adamowicz, eds. *Towards Sustainable Management of the Boreal Forest*. NRC Research Press, Ottawa, ON.
- Thorpe, A.S.; Aschehoug, E.T.; Atwater, D.Z.; Callaway, R.M. 2011. Interactions among plants and evolution. *J. Ecol.* 99:729–740.
- Thuiller, W.; Albert, C.; Araújo, M.B.; Berry, P.M.; Cabeza, M.; Guisan, A.; Hickler, T.; Midgley, G.F.; Paterson, J.; Schurr, F.M.; Sykes, M.T.; Zimmermann, N.E. 2008. Predicting

- global change impacts on plant species' distributions: future challenges. *Perspect. Plant Ecol. Evol. Syst.* 9:137–152.
- Tobin, P.C.; Nagarkatti, S.; Loeb, G.; Saunders, M.C. 2008. Historical and projected interactions between climate change and insect voltinism in a multivoltine species. *Glob. Change Biol.* 14:951–957.
- Torsvik, V.; Øvreås, L. 2002. Microbial diversity and function in soil: from genes to ecosystems. *Curr. Opin. Microbiol.* 5:240–245.
- Traill, L.W.; Lim, M.L.M.; Sodhi, N.S.; Bradshaw, C.J.A. 2010. Mechanisms driving change: altered species interactions and ecosystem function through global warming. *J. Anim. Ecol.* 79:937–947.
- Trumbore, S. 2000. Age of soil organic matter and soil respiration: radiocarbon constraints on belowground C dynamics. *Ecol. Appl.* 10:399–411.
- Trumbore, S.E.; Chadwick, O.A.; Arundson, R. 1996. Rapid exchange between soil carbon and atmospheric carbon dioxide driven by temperature change. *Science* 272:393–396.
- Tylianakis, J.M.; Didham, R.K.; Bascompte, J.; Wardle, D.A. 2008. Global change and species interactions in terrestrial ecosystems. *Ecol. Lett.* 11:1351–1363.
- van Mantgem, P.J.; Stephenson, N.L.; Byrne, J.C.; Daniels, L.D.; Franklin, J.F.; Fulé, P.Z.; Harmon, M.E.; Larson, A.J.; Smith, J.M.; Taylor, A.H.; Veblen, T.T. 2009. Widespread increase of tree mortality rates in the western United States. *Science* 323:521–524.
- Varghese, J.; Krogman, N.T.; Beckley, T.M.; Nadeau, S. 2006. Critical analysis of the relationship between local ownership and community resiliency. *Rural Sociol.* 71:505–527.
- Visser, M.E.; Both, C. 2005. Shifts in phenology due to global climate change: the need for a yardstick. *Proc. R. Soc. Biol. Sci. Ser. B* 272:2561–2569.
- Visser, M.E.; Both, C.; Lambrechts, M.M. 2004. Global climate change leads to mistimed avian reproduction. Pages 89–110 in A. Møller, W. Fiedler, and P. Berthold, eds. *Birds and Climate Change*. Elsevier Academic Press, Oxford.
- Visser, M.E.; Caro, S.P.; van Oers, K.; Schaper, S.V.; Helm, B. 2010. Phenology, seasonal timing and circannual rhythms: towards a unified framework. *Philos. Trans. R. Soc. Biol. Sci.* 365:3113–3127.
- Wang, X.L.; Wan, H.; Swail, V.R. 2006. Observed changes in cyclone activity in Canada and their relationships to major circulation regimes. *J. Clim.* 19:896–915.
- Weltzin, J.F.; Loik, M.E.; Schwinning, S.; Williams, D.C.; Fay, P.A.; Haddad, B.M.; Harte, J.; Huxman, T.E.; Knapp, A.K.; Lin, G.; Pockman, W.T.; Shaw, M.R.; Small, E.E.; Smith, M.O.; Smith, S.D.; Tissue, D.T.; Zak, J.C. 2003. Assessing the response of terrestrial ecosystems to potential changes in precipitation. *BioScience* 53:941–952.
- Westfall, J.; Ebata, T. 2010. 2010 Summary of forest health conditions in British Columbia. Pest Management Report Number 15. BC Forest Service, Ministry of Forests, Mines, and Lands, Victoria, BC. 70 p.
- Williams, J.W.; Jackson, S.T. 2007. Novel climates, no-analog communities, and ecological surprises. *Front. Ecol. Environ.* 5:475–482.
- Williams, J.W.; Shuman, B.; Webb III, T.; Bartlein, P.J.; Leduc, P.L. 2004. Late-quaternary vegetation dynamics in North America: scaling from taxa to biomes. *Ecol. Monogr.* 74:309–334.
- Williamson, T.; Hessel, H.; Johnston, M. 2012. Adaptive capacity deficits and adaptive capacity of economic systems in climate change vulnerability assessment. *For. Policy Econ.* 15:160–166.
- Willis, K.J.; MacDonald, G.M. 2011. Long-term ecological records and their relevance to climate change predictions for a warmer world. *Ann. Rev. Ecol. Evol. Syst.* 42:267–287.
- Woods, A.; Coates, K.D.; Hamann, A. 2005. Is an unprecedented *Dothistroma* needle blight epidemic related to climate change? *BioScience* 55:761–769.
- Wotton, B.M.; Nock, C.A.; Flannigan, M.D. 2010. Forest fire occurrence and climate change in Canada. *Int. J. Wildland Fire* 19:253–271.
- Xiao, J.F.; Zhuang, Q.L. 2007. Drought effects on large fire activity in Canadian and Alaskan forests. *Environ. Res. Lett.* 2; doi:10.1088/1748-9326/2/4/044003.
- Zarnetske, P.L.; Skelly, D.K.; Urban, M.C. 2012. Biotic multipliers of climate change. *Science* 336:1516–1518.
- Zha, T.; Barr, A.G.; van der Kamp, G.; Black, T.A.; McCaughey, J.H.; Flanagan, L.B. 2010. Interannual variation of evapotranspiration from forest and grassland ecosystems in western Canada in relation to drought. *Agric. For. Meteorol.* 150:1476–1484.
- Zhang, X.; Brown, R.; Vincent, L.; Skinner, W.; Feng, Y.; Mekis, E. 2011. Canadian climate trends, 1950–2007. Canadian biodiversity: ecosystem status and trends 2010. Technical Thematic Report No. 5. Canadian Councils of Resource Ministers, Ottawa, ON. 21 p.
- Zhang, X.; Harvey, D.K.; Hogg, W.D.; Yuzyk, T.D. 2001. Trends in Canadian streamflow. *Water Resour. Res.* 37:987–998.
- Zhang, Y.; Chen, W.; Smith, S.L.; Riseborough, D.W.; Cihlar, J. 2005. Soil temperature in Canada during the twentieth century: complex responses to atmospheric climate change. *J. Geophys. Res.* 110; doi:10.1029/2004JD004910.
- Zimmermann, N.E.; Edwards, T.C.; Graham, C.; Pearman, H.P.B.; Svenning, J.C. 2010. New trends in species distribution modelling. *Ecography* 33:985–989.
- Zoellick, B.; Nelson, S.J.; Schauffler, M. 2012. Participatory science and education: bringing both views into focus. *Front. Ecol. Environ.* 10:310–313.

● ● ● ANNEXE 1. INDICATEURS DES EFFETS DES CHANGEMENTS CLIMATIQUES UTILISÉS DANS LE MONDE

Kremsater (2012) a passé en revue la littérature scientifique pour déterminer, parmi les indicateurs utilisés dans le monde, ceux qui pourraient être utiles au Canada. Le présent rapport et les annexes qu'il contient fournissent des exemples détaillés d'indicateurs utilisés par différents pays qui s'intéressent aux effets des changements climatiques sur les forêts. Le tableau A1 résume les types d'indicateurs que l'on trouve dans chaque juridiction. Une case marquée d'un « d » indique que les autorités compétentes ont discuté de l'indicateur en question ou l'ont décrit en termes d'impact dans le cadre des stratégies ou des systèmes de surveillance gouvernementaux établis en matière de changements climatiques. La lettre « m » indique que les autorités ont mesuré l'indicateur (au lieu de seulement l'analyser). Le tableau ne tient pas compte des projets de recherche ou des études de cas, à moins qu'ils ne fassent partie d'un programme de surveillance ou d'une stratégie d'adaptation structurés.

La revue de la littérature scientifique (Kremsater, 2012) a fait ressortir quelques considérations générales qui sont importantes. Au moment d'effectuer cette revue, aucune autorité compétente ne disposait d'un programme cohérent et exhaustif permettant de surveiller les effets des changements climatiques sur les forêts. Eastaugh et coll. (2009) ont noté que l'Agence européenne pour l'environnement (AEE) avait exclu la foresterie de son rapport de 2004 sur les effets des changements climatiques, à cause du manque d'information. L'étude des effets des changements climatiques sur les forêts va du suivi de la superficie des forêts et des taux de déboisement et de boisement à l'application d'indicateurs plus complexes. C'est en Europe (plus particulièrement au Royaume-Uni) et aux États-Unis que l'on trouve les programmes les plus complets pour le suivi des effets des changements climatiques sur les écosystèmes. Des travaux de recherche considérables sont menés au Canada, mais le pays compte moins de systèmes nationaux de données que les États-Unis et les pays les plus avancés d'Europe.

Aux États-Unis, le *US Forest Inventory and Analysis National Program* et le *US National Forest Health Monitoring Program* fournissent une quantité appréciable de renseignements utiles pour le suivi des effets des changements climatiques sur les forêts. De nombreux chercheurs et responsables de programmes étatiques se servent de cette information, mais pas dans le cadre d'une initiative de suivi systématique nationale. Plusieurs organisations nationales ont décrit les effets prévus des changements climatiques sur les forêts, auxquels correspondent des indicateurs (p. ex., le *Pew Research Center*, établi par *The Pew Charitable Trusts*, de même que la *US Environmental Protection Agency (EPA)*, le *US Forest Service* du *Département of Agriculture (USDA)*, le *US Geological*

Survey (USGS) et le *US Department of the Interior*). Certains programmes du gouvernement américain fournissent des renseignements qui présentent un intérêt à l'échelle mondiale. La *National Aeronautics and Space Administration (NASA)*, par exemple, possède de nombreux satellites de télédétection qui peuvent relayer des renseignements pertinents. L'information est habituellement fournie sans frais, et l'institution s'efforce d'en améliorer l'accessibilité. Le *National Ecological Observatory Network (NEON)* dispose d'un réseau de stations national qui lui permet de surveiller les changements à l'échelle continentale en matière de climat, d'écosystèmes et d'espèces (NEON, 2011). Quant aux différents États américains, la Californie et les États du Nord-Est ont publié les rapports les plus exhaustifs sur les effets des changements climatiques et les solutions potentiels. Ces rapports abordent notamment la question des effets et des mesures à prendre en ce qui concerne les systèmes forestiers. Les États du Nord-Ouest suivent de près. Le groupe d'évaluation des impacts sur le climat de l'Arctique a évalué de manière approfondie les effets des changements climatiques en Alaska et dans les régions arctiques du monde. Une nouvelle initiative, appelée *Arctic-Boreal Vulnerability Experiment*, vise également la surveillance des effets du réchauffement climatique sur la couverture des terres et la géomorphologie, le dégel du pergélisol, les perturbations des forêts et les cycles du carbone et de l'eau dans les écosystèmes arctiques et boréaux des États-Unis et du Canada.

En Europe, la Commission économique des Nations Unies pour l'Europe et l'Union européenne ont créé, en 1985, l'*International Co-operative Program on Assessment and Monitoring of Air Pollution Effects on Forests*. L'objectif visé était de surveiller l'état de santé des forêts afin de déterminer les effets de la pollution. Bien que les quelque 6 000 parcelles d'observation du programme, réparties de façon systématique à l'échelle de l'Europe, n'aient pas été établies pour le suivi des effets des changements climatiques, elles ont tout de même permis de mesurer les variations spatiales et temporelles à grande échelle de l'état des forêts par rapport à des facteurs naturels et anthropiques. Le programme comprend des parcelles de niveau I, II et III, chaque niveau correspondant à des mesures et à un degré d'intensité différents. De plus, l'Agence européenne pour l'environnement surveille l'état des forêts et de l'environnement. De nombreuses évaluations ne portent pas spécifiquement sur les changements climatiques et rendent compte de l'état de la forêt. Des publications récentes abordent toutefois la question des changements climatiques et de leurs effets potentiels sur les forêts.

Le *Partnership for European Environmental Research* est une institution qui réalise des travaux exhaustifs de recherche et d'évaluation à l'échelle de l'Europe. Cette institution a noté

l'absence d'activités de surveillance portant sur les impacts des changements climatiques sur les forêts. Cependant, c'est le *European Forest Data Centre* qui centralise maintenant les données stratégiques sur les forêts. Le site de l'institution fournit des liens donnant accès à de l'information sur les forêts, y compris à des ensembles de données, et peut faciliter la surveillance et l'analyse des effets des changements climatiques sur les forêts. De nombreux pays européens sont membres de la Convention-cadre des Nations Unies sur les changements climatiques (CCNUCC) et effectuent des évaluations nationales sur les effets des changements climatiques et les mesures d'adaptation et d'atténuation prises à cet égard. Les rapports sur les forêts doivent habituellement fournir des précisions sur l'étendue du couvert forestier, les activités de boisement, la séquestration du dioxyde de carbone (CO₂) et les effets potentiels des feux, des insectes, des maladies et des sécheresses. Certains pays européens sont en mesure de quantifier ces effets, tandis que d'autres (dont la majorité des pays en développement membres de la CCNUCC) se limitent à fournir des données sur l'étendue du couvert forestier, les taux de boisement et la séquestration du CO₂. Même les petits pays d'Europe (p. ex., l'Estonie et la Croatie) présentent des évaluations nationales d'une qualité impressionnante à la CCNUCC.

À l'échelle des pays européens (y compris la Russie), le Royaume-Uni et la France ont mis sur pied les programmes les plus exhaustifs. Plusieurs autres pays se sont cependant dotés de programmes efficaces pour la surveillance des forêts. De nombreux pays surveillent de près les variables climatiques, mais aucun n'assure le suivi des changements attribuables au climat qui se produisent dans les forêts. Le Royaume-Uni dispose de nombreux programmes pour surveiller les changements touchant les espèces, l'un des principaux étant le projet *MONARCH* (pour *Modelling Natural Resource Responses to Climate Change*, ou modélisation des effets des changements climatiques sur les ressources naturelles). Le projet MONARCH s'attarde au suivi des changements touchant la répartition, l'abondance et la phénologie des espèces. Le Royaume-Uni a établi 34 indicateurs pour les changements climatiques. Ces indicateurs ne portent pas spécifiquement sur les forêts, mais comprennent notamment (en plus des facteurs climatiques abiotiques habituels) la phénologie des oiseaux, les chants de grenouilles, la phénologie des végétaux (débourement des bourgeons), la saison de croissance, le débit de l'eau et la santé des hêtres. La France élabore actuellement un programme afin de surveiller la biodiversité de différents écosystèmes, dont les écosystèmes forestiers (ONERC, 2010). La Russie effectue des recherches sur les systèmes boréaux en collaboration avec l'Europe et d'autres pays (dont le Canada). L'Allemagne, la Finlande, la Suède et la Norvège ont aussi des programmes efficaces de surveillance des forêts, mais ces programmes ne sont pas axés sur les changements climatiques. Bien que le suivi des effets des

changements climatiques sur les forêts soit relativement peu structuré, bon nombre de pays ou d'instances disposent de programmes leur permettant d'assurer le suivi des activités d'aménagement forestier et d'évaluer ces activités par rapport à des indicateurs d'aménagement forestier durable (p. ex., Franc et coll., 2001; FAO, 2011).

De nombreuses évaluations d'envergure nationale, réalisées notamment au Canada, aux États-Unis et en Europe, se fondent sur les résultats de projets de recherche précis pour démontrer les effets des changements climatiques et en fournir des exemples, mais ces projets s'inscrivent rarement dans un cadre plus global de surveillance à l'échelle provinciale ou nationale des effets des changements climatiques sur les forêts. Par ailleurs, de nombreux pays ont mis en place des systèmes très efficaces pour suivre l'évolution de facteurs climatiques abiotiques (p. ex., la température, les précipitations sous forme de pluie ou de neige, etc.) et de processus physiques (p. ex., les glaciers et le débit de l'eau). C'est le cas du Canada. Johnston et coll. (2010) indiquent que des données sont recueillies dans le sud du Canada depuis plus d'un siècle, et depuis le milieu du 20^e siècle dans d'autres régions du pays. Ces données, combinées aux données satellitaires recueillies depuis quelques décennies, fournissent un portrait détaillé de l'évolution du climat au Canada au cours des cinquante dernières années. Pour l'ensemble du pays, nous disposons de tendances historiques et prévues en ce qui concerne les températures, les précipitations, la fonte des neiges, le dégel du pergélisol et plusieurs autres facteurs abiotiques. Pour certains indicateurs, les tendances historiques et projetées sont relativement certaines; pour d'autres, comme les précipitations, les tendances historiques sont connues, mais les prévisions demeurent incertaines, tant pour la direction que pour l'ampleur. Malgré ces incertitudes, le Canada dispose néanmoins d'indicateurs reconnus et bien quantifiés pour plusieurs (mais pas pour la totalité) des effets abiotiques des changements climatiques.

Au Canada, notre compréhension de la façon dont les forêts ont réagi ou réagiront aux changements climatiques ainsi que l'utilisation d'indicateurs pour suivre les changements dans les forêts accuse du retard par rapport à notre compréhension des effets des changements climatiques sur les variables abiotiques. Les effets des changements climatiques devraient être plus marqués dans les régions forestières du Canada que dans beaucoup d'autres régions du monde (Field et coll., 2007). De nombreux articles scientifiques et rapports techniques ont mentionné les changements prévus, mais aucune des provinces n'a mis sur pied un programme structuré de surveillance des changements dus au climat dans les forêts. Plusieurs provinces ont signalé la nécessité de surveiller les effets des changements climatiques sur les forêts, mais aucune n'a entrepris d'activité de surveillance rigoureuse. Au Québec, le consortium Ouranos sur la climatologie régionale et

l'adaptation aux changements climatiques (Gouvernement du Québec, 2008) assure le suivi de nombreuses variables biologiques en lien avec les changements climatiques, mais ne s'attarde pas aux forêts. L'Ontario a entrepris plusieurs activités de recherche. La Colombie-Britannique a sélectionné des indicateurs et entrepris la réalisation d'études de cas sur les effets des changements climatiques, mais n'a pas commencé à suivre les changements qui se produisent dans les forêts. Dans cette province, une institution provinciale analyse les facteurs climatiques et les changements abiotiques historiques et prévus qui sont associés aux changements climatiques, notamment en ce qui concerne les glaciers, la couverture de glace et la fonte des neiges (*Pacific Climate Impacts Consortium*) (Rodenhuis et coll., 2009). Aucun effort de suivi similaire n'a cependant été déployé pour les systèmes écologiques. L'Alberta recommande l'établissement d'une institution de surveillance et assure déjà le suivi systématique de nombreux indicateurs biologiques (*Alberta Biodiversity Monitoring Institute*); l'accent n'est toutefois pas mis sur les changements climatiques.

De nombreuses instances, notamment au Canada, reconnaissent que les changements se répercutent sur les forêts. Elles veulent

obtenir de l'information sur les changements qui se produisent et sont conscientes de l'importance de tirer parti des initiatives en cours (Beever et Woodward, 2011). La mise sur pied d'un programme de suivi comme celui qui est projeté par le SCF irait dans le sens des nombreux rapports stratégiques qui soulignent la nécessité d'exercer une surveillance (p. ex., Secrétariat des changements climatiques du Nouveau-Brunswick, 2007; Conseil des ministres de l'Environnement des provinces de l'Atlantique, 2008; Alberta Environmental Monitoring Panel, 2011), sans toutefois énoncer de recommandations précises à cet égard. Bien que le suivi des effets des changements climatiques sur les forêts au moyen de programmes structurés en soit encore à ses débuts, les travaux de recherche à ce sujet abondent et constituent une assise solide pour la coordination et la collaboration à l'échelle internationale. En investissant dans des programmes de suivi et en favorisant la concertation entre les gouvernements, les ONG et les universités, nous serons mieux à même de surveiller les effets des changements climatiques sur les écosystèmes forestiers, ce qui est essentiel pour l'élaboration de stratégies d'atténuation et d'adaptation proactives.

Tableau A1. Sommaire des indicateurs énumérés dans la revue, par juridictions : Canada, États-Unis, Europe et autres pays et organisations mondiales. d = indicateurs discutés comme étant pertinents; m = indicateurs mesurés dans un cadre structuré

Canada	Ntl	C.-B.	Alb.	Sask.	Man.	Pr.	Ont.	Qc.	Atl.	N.-B.	N.-É.	T.-N.-L.	Yn	Nt
Facteurs climatiques														
Saison de croissance	d	m	d	d		d	d	d					d	
Température	m	m	m	m	m	m	m	m	m	m	m	m	m	
Précipitations	m	m	m	m	m	m	m	m	m	m	m	m	m	
Phénomènes climatiques extrêmes	m	m	m	m	m	m	m	m	m	d		d	m	
Sécheresse	d	m	m	m	m	m	m	m				d	m	
Croissance														
Régénération	d	d				d								
Productivité	d	d				d	d		d		d		d	
Taux de mortalité	d	d				d	d		d	d	d		d	
Changements physiques														
Pergélisol	d	d			d	d	d	d		d				
Glaciers	d	m			d	d								
Neige et glace	d	m		d	d	d	d					m		
Température de l'eau	d	d		d	d	d	d							
Qualité de l'eau	d	d	d	d	d	d	d	d						
Débits des cours d'eau	d	m	d	d	d	d	d	d						
Milieux humides et lacs	d	d	d	d		d	m	d						
Phénologie														
Animaux	d	d		d		d	d	m					d	
Végétaux	d	d		d		d	d	m					d	
Perturbations naturelles														
Feux	d	d	d	d	d	d	d		d	d	d		d	
Inondations	d	d		d	d	d	d						d	
Vents	d	d		d	d	d	d						d	
Mouvement de terrain	d	d		d	d	d	d						d	
Insectes	d	m	d	d	d	d	m		d	d	d		d	
Agents pathogènes	d	m	d	d		d	m				d		d	
Sols														
Éléments nutritifs	d				d	d		d					d	
Erosion	d	d			d	d	d	d					d	
Répartition														
Limite des arbres	d	d	d	d	d	d	d	d					d	
Taxons animaux	d	d	m	d		d	d	m	d	d			d	
Taxons végétaux	d	d	m	d		d	d	m	d	d			d	
Espèces d'arbres	d	d	m	d	d	d	d	d	d	d	d		d	
Espèces exotiques envahissantes	d	m	m	d		d	d	d			d		d	
Économie et société														
Approvisionnement en fibres	d	d			d	d	d		d	d			d	
Produits forestiers non ligneux	d	d			d	d			d				d	
Coûts	d	d				d			d	d			d	
Autres effets	d	d	d		d	d	d		d	d			d	

Ntl, national (Canada); C.-B., Colombie-Britannique; Alb., Alberta; Sask., Saskatchewan; Man., Manitoba; Pr., Princes; Ont., Ontario; Qc., Québec; Atl., Atlantique; N.-B., Nouveau-Brunswick; N.-É., Nouvelle-Écosse; T.-N.-L., Terre-Neuve-et-Labrador; Yn, Yukon; Nt, Nunavut.

(à suivre)

Tableau A1. (suite)

États-Unis	PEW	EPA	USDA	NASA	USGS	TNC	USFW	NH	AL	CA	NC	ME	MD	MA	MI
Facteurs climatiques															
Saison de croissance	d	m		m		d		d	d		d			d	
Température	d	m	d	m		d		m	m	m	m			m	
Précipitations	d	m	d	m		d		m	m	m	m			m	
Phénomènes climatiques extrêmes		m				d		m	m	m	m			m	
Sécheresse	d	m	d			d		d	d	d	d		d	d	
Croissance															
Régénération								d	d						
Productivité	d		d	m				d	d	d					
Taux de mortalité	d		d					d	d	d	d				
Changements physiques															
Pergélisol	d							d	d						
Glaciers	d			m	d			d	d	d					
Neige et glace	d			m	d			d	d					d	
Température de l'eau	d			m	d			d	d	d	d			d	
Qualité de l'eau		m		m	d			d	d	d	d			d	
Débits des cours d'eau	d	m	d	m	d			d	d	d	d			d	
Milieux humides et lacs	d	m	d	m	d			d	d	d	d		d	d	
Phénologie															
Animaux	d		d	m	d	d		d	d	d	d				
Végétaux	d		d	m	d	d		d	d	d	d		d	d	
Perturbations naturelles															
Feux	d		d		d	d		d	d	d	d		d		
Inondations	d					d		d	d	d	d		d		
Vents	d		d					d	d		d				
Mouvement de terrain	d							d	d						
Insectes	d		d			d	d	d	d	d					
Agents pathogènes	d		d			d	d	d	d	d					
Sols															
Éléments nutritifs			d					d	d		d				
Érosion			d			d		d	d						
Répartition															
Limite des arbres	d	d	d			d	d	d	d	d	d			d	
Taxons animaux	d	d	d	d	d	d	d	d	d	d	d		d	d	
Taxons végétaux	d	d	d	d	d	d	d	d	d	d	d		d	d	
Espèces d'arbres	d	d	d				d	d	d	d	d		d	d	
Espèces exotiques envahissantes		d	d				d	d	d	d	d			d	
Économie et société															
Approvisionnement en fibres	d							d	d						
Produits forestiers non ligneux									d						
Coûts									d						
Autres effets										d					

PEW, Pew Research Center; EPA, Environmental Protection Agency; USDA, United States Department of Agriculture; NASA, National Aeronautics and Space Administration; USGS, U.S. Geological Survey; TNC, The Nature Conservancy; USFW, U.S. Fish & Wildlife Service; NH, national (États-Unis); AL, Alabama; CA, Californie; NC, Caroline du Nord; ME, Maine; MD, Maryland; MA, Massachusetts; MI, Michigan.

(à suivre)

Tableau A1. (suite)

États-Unis	MN	NH	OR	PA	VT	VA	WA	WI	WY	N.-E. É.-U.	GL	N.M. É.-U.	US ROCK
Facteurs climatiques													
Saison de croissance	d				d		d	d		m	d		d
Température	m	m	m		m	d		d	d	d		d	d
Précipitations	m	m	m		m	d		d	d			d	d
Phénomènes climatiques extrêmes	m	m			m	d		d		m	d		d
Sécheresse	d	d	d		d	d	d	d	d	d		d	d
Croissance													
Régénération													
Productivité		d			d			d			d		d
Taux de mortalité	d	d			d			d					d
Changements physiques													
Pergélisol													
Glaciers			m		d		m						
Neige et glace			d	d			d	d	d	m	d		
Température de l'eau	d					d			d		d		
Qualité de l'eau	d						d		d		d		
Débits des cours d'eau	d		d		d	d	d	d	d	m	d		
Milieux humides et lacs			d					d	d				
Phénologie													
Animaux	d				d					d	d		d
Végétaux	d	d			d					m	d		d
Perturbations naturelles													
Feux	d	d	d		d		d	d	d				d
Inondations	d	d	d		d		d				d		
Vents	d	d	d		d		d	d					
Mouvement de terrain			d				d	d					
Insectes			d		d	d	d	d	d	d	d	d	d
Agents pathogènes			d		d		d						d
Sols													
Éléments nutritifs								d		m	d		
Érosion								d					
Répartition													
Limite des arbres			d	d	d	d	d	d		d	d		d
Taxons animaux			d	d	d	d	d	d		d	d		d
Taxons végétaux	d	d	d		d	d	d	d			d		d
Espèces d'arbres	d	d	d			d	d	d	d		d		d
Espèces exotiques envahissantes	d	d	d			d	d	d	d	d			d
Économie et société													
Approvisionnement en fibres		d		d					d	d			
Produits forestiers non ligneux													
Coûts							d						
Autres effets										d			

MN, Minnesota; NH, New Hampshire; OR, Oregon; PA, Pennsylvanie; VT, Vermont; VA, Virginie;
WA, Washington; WI, Wisconsin; WY, Wyoming; N.-E. É.-U., Nord-Est des États-Unis; GL, Grands
Lacs; N. M. É.-U., Nord et Midwest des États-Unis; US ROCK, Montagnes Rocheuses, É.-U.

(à suivre)

Tableau A1. (suite)

Europe	EU	AL	BEL	BUL	CRO	CZE	EST	FIN	FRA	GER	HUN	IRL	NED	NOR	RUS	SWE	GBR
Facteurs climatiques																	
Saison de croissance	m					d		d	d	d		d	d	d		d	m
Température	m		m	m	m	m	m	m	m	m	m	m	m	m	m	m	m
Précipitations	m		m	m	m	m	m	m	m	m	m	m	m	m	m	m	m
Phénomènes climatiques extrêmes	m		m	m	m		m	m	m	m	m	m	m	m	m	m	m
Sécheresse	d		m	m			d	d	d		d	d	d	d	d	d	
Croissance																	
Régénération											d						
Productivité	d		d	d		d								d	d	d	
Taux de mortalité	d		d	d		d		d						d	d	d	
Changements physiques																	
Pergélisol	d							d						d	d		
Glaciers	d								d						d		m
Neige et glace	d				m		m		d					d	d	d	
Température de l'eau	d											d	d			d	
Qualité de l'eau	d		d				d					d	d			d	
Débits des cours d'eau	d		d		m	d	d			d		d	d	d		d	
Milieux humides et lacs	d									d		d	d	d			d
Phénologie																	
Animaux	d		d		d			d	d	d						d	m
Végétaux	d		d		d			d	d	d						d	m
Perturbations naturelles																	
Feux	d	d		d	d		d								d	d	
Inondations	d		d	d						d				d	d	d	
Vents	d			d			m									d	
Mouvement de terrain	d									d				d		d	
Insectes	d	d	d	d			d	d	d	d				d	d	d	d
Agents pathogènes	d		d				d	d						d	d	d	d
Sols																	
Éléments nutritifs	d						d			d	d				d	d	d
Erosion	d			d	d	d		d		d						d	d
Répartition																	
Limite des arbres	d		d	d				d			d			d	d	d	m
Taxons animaux	d		d		m			d		d	d			d		d	m
Taxons végétaux	d		d		m			d		d					d	d	m
Espèces d'arbres	d	d	d	d	d	d		d		d				d	d	d	m
Espèces exotiques envahissantes	d							d						d		d	d
Économie et société																	
Approvisionnement en fibres	d	d					d	d				d		d		d	m
Produits forestiers non ligneux	d							d				d					
Coûts	d																
Autres effets								d						d		d	

EU, ensemble de l'Europe; AL, Albanie; BEL, Belgique; BUL, Bulgarie; CRO, Croatie; CZE, République tchèque; EST, Estonie; FIN, Finlande; FRA, France; GER, Allemagne; HUN, Hongrie; IRL, Irlande; NED, Pays-Bas; NOR, Norvège; RUS, Russie; SWE, Suède; GBR, Royaume-Uni (y compris MONARCH).

(à suivre)

Tableau A1. (suite et fin)

Autres pays / Organismes internationaux	AMER	ASIA	AUS	IND	IDN	CHN	OI	FAO ONU IUFRO	GIEC	CDB	PAYS DEV. ONU
Facteurs climatiques											
Saison de croissance				d				m	m	d	
Température	m		m	m		m		m	m	d	m
Précipitations	m		m	m		m		m	m	d	m
Phénomènes climatiques extrêmes			m	m		m		m	m	d	m
Sécheresse			d	d		m		m	m	d	m
Croissance											
Régénération								d		d	
Productivité						d		d		d	
Taux de mortalité						d		d		d	
Changements physiques											
Pergélisol								d		d	
Glaciers				d		m		d		d	
Neige et glace				d				d		d	d
Température de l'eau				d				d		d	
Qualité de l'eau				d				d		d	
Débits des cours d'eau	d		d	d	d	m		d	d	d	d
Milieux humides et lacs								d		d	
Phénologie											
Animaux								d		d	
Végétaux						d		d		d	
Perturbations naturelles											
Feux			d					d	d	d	
Inondations			d					d	d	d	d
Vents								d		d	
Mouvement de terrain								d		d	
Insectes						m		d		d	
Agents pathogènes						m		d		d	
Sols											
Éléments nutritifs						d		d		d	
Érosion					d	d		d		d	
Répartition											
Limite des arbres				d		d		d	d	d	
Taxons animaux				d				d	d	d	
Taxons végétaux				d		d		d	d	d	
Espèces d'arbres	d	d		d		d		m	d	d	m
Espèces exotiques envahissantes				d				d		d	d
Économie et société											
Approvisionnement en fibres								d		d	
Produits forestiers non ligneux								d		d	
Coûts								d		d	
Autres effets						d		d		d	

AMER, Amériques; AUS, Australie; IND, Inde; IDN, Indonésie; CHN, Chine; OI, organismes internationaux; FAO, Organisation des Nations Unies pour l'alimentation et l'agriculture; ONU, Organisation des Nations Unies; IUFRO, Union internationale des instituts de recherches forestières; GIEC, Groupe d'étude intergouvernemental sur les changements climatiques; CDB, Convention sur la diversité biologique; PAYS DEV. ONU, pays en développement des Nations Unies.

Références

- Alberta Environmental Monitoring Panel. 2011. A world class environmental monitoring, evaluation and reporting system for Alberta. 84 p. <http://environment.gov.ab.ca/info/library/8381.pdf> [Consulté en août 2013]
- Atlantic Environment Ministers. 2008. Climate change adaptation strategy for Atlantic Canada. Atlantic Environment Ministers Meeting, June 2008. 11 p. <http://www2.gnb.ca/content/dam/gnb/Departments/env/pdf/Climate-Climatiques/ClimateChange%20AdaptationStrategyAtlanticCanada.pdf> [Consulté en août 2013]
- Beever, E.A.; Woodward, A. 2011. Design of ecoregional monitoring in conservation areas of high-latitude ecosystems under contemporary climate change. *Biol. Conserv.* 144:1258–1269.
- Eastaugh, C.; Reyer, C.; González Moreno, P.; Wu, J.; Biscaia, A.G.; Pentelkina, O. 2009. Forest agencies' early adaptations to climate change. International Union of Forest Research Organizations, Vienna. 80 p.
- Field, C.B.; Mortsch, L.D.; Brklacich, M.; Forbes, D.L.; Kovacs, P.; Patz, J.A.; Running, S.W.; Scott, M.J. 2007. North America. Pages 617–652 in M.L. Parry, O.F. Canziani, J.P. Palutikof, P.J. van der Linden, and C.E. Hanson, eds. *Climate Change 2007: Impacts, Adaptation and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press, Cambridge, UK. <http://www.ipcc.ch/pdf/assessment-report/ar4/wg2/ar4-wg2-chapter14.pdf> [Consulté en août 2013]
- Franc, A.; Laroussinie, O.; Karjalainen, T., eds. 2001. Criteria and indicators for sustainable forest management at the forest management unit level. Proceedings of a conference on behalf of IUFRO Task Force on Sustainable Forest Management, Nancy, France, 21–25 March 2000. European Forest Institute, Nancy, France. 277 p.
- Gouvernement du Québec. 2008. Le Québec et les changements climatiques : un défi pour le futur. Plan d'action 2006–2012. Ministère du Développement durable, de l'Environnement et des Parcs, Québec, QC. 52 p.
- Johnston, M.; Price, D.; L'Hirondelle, S.; Fleming, R.; Ogden, A. 2010. Tree species vulnerability and adaptation to climate change: final technical report. Saskatchewan Research Council, Saskatoon, SK. 125 p. http://www.for.gov.bc.ca/ftp/HFP/external/publish/ClimateChange/Partner_Publications/Vulnerability_of_Canadas_Tree_Species_to_Climate_Change_Technical_Report_SRC.pdf [Consulté en août 2013]
- Kremsater, L. 2012. Scan of climate change indicators relevant to forests and forestry. Report prepared on contract for Natural Resources Canada. Natural Resources Canada, Canadian Forest Service, Pacific Forestry Centre, Victoria, BC. Unpublished report available on request from pfcpublishings@nrcan-rncan.gc.ca.
- [NEON] National Ecological Observatory Network. 2011. 2011 Science strategy. 55 p. <http://www.neoninc.org/science/sciencestrategy> [Consulté en août 2013]
- [ONERC] Observatoire National sur les Effets du Réchauffement Climatique. 2010. Catalogue des indicateurs du changement climatique. Ministère de l'Écologie, de l'Énergie, du Développement durable et de la Mer, Paris. 30 p. http://www.developpement-durable.gouv.fr/IMG/pdf/catalogue_onerc_version_web_decembre2010_v2.pdf [Consulté en août 2013]
- Organisation des Nations Unies pour l'alimentation et l'agriculture [FAO]. 2011. Situation des forêts du monde 2011. FAO, Rome. 164 p. <http://www.fao.org/docrep/013/i2000f/i2000f.pdf> [Consulté en août 2013]
- Rodenhuis, D.R.; Bennett, K.E.; Werner, A.T.; Murdock, T.Q.; Bronaugh, D. 2009. Hydro-climatology and future climate impacts in British Columbia. Pacific Climate Impacts Consortium, University of Victoria, Victoria, BC. 132 p. http://www.pacificclimate.org/sites/default/files/publications/Rodenhuis_ClimateOverview.Mar2009.pdf [Consulté en août 2013]
- Secrétariat des changements climatiques du Nouveau-Brunswick. 2007. Plan d'action sur les changements climatiques 2007–2012 : Résumé. Ministère de l'Environnement du Nouveau-Brunswick, Fredericton, NB. 11 p. http://www2.gnb.ca/content/gnb/fr/ministeres/egl/environnement/content/changements_climatiques/content/plan_daction.html [Consulté en août 2013]

● ● ● ANNEXE 2. COLLABORATEURS ET RÉVISEURS

Ensemble du document

Dean Thompson, SCF, Centre de foresterie des Grands Lacs,
Sault Ste. Marie (Ont.)

Introduction

Perspective : occasions et défis

Pierre Bernier, SCF, Centre de foresterie des Laurentides,
Québec (QC)

Bill de Groot, SCF, Centre de foresterie des Grands Lacs,
Sault Ste. Marie (Ont.)

Facteurs climatiques

Bill de Groot, SCF, Centre de foresterie des Grands Lacs,
Sault Ste. Marie (Ont.)

Perturbations naturelles

Barry Cooke, SCF, Centre de foresterie du Nord, Edmonton (Alb.)

Martin Girardin, SCF, Centre de foresterie des Laurentides,
Québec (QC)

Ron Hall, SCF, Centre de foresterie du Nord, Edmonton (Alb.)

Rona Sturrock, SCF, Centre de foresterie du Pacifique,
Victoria (C.-B.)

Phénologie des espèces

Barry Cooke, SCF, Centre de foresterie du Nord, Edmonton (Alb.)

Rich Fleming, SCF, Centre de foresterie des Grands Lacs,
Sault Ste. Marie (Ont.)

Nathalie Isabel, SCF, Centre de foresterie des Laurentides,
Québec (QC)

Ken McIlwrick, SCF, Centre de foresterie des Grands Lacs,
Sault Ste. Marie (Ont.)

Conditions et processus édaphiques

David Paré, SCF, Centre de foresterie des Laurentides,
Québec (QC)

Jean-Lionel Payeur, University of Bayreuth, Allemagne

Evelyne Thiffault, SCF, Centre de foresterie des Laurentides,
Québec (QC)

Dimensions humaines liées aux forêts

Bill Anderson, SCF, Centre de foresterie de l'Atlantique,
Fredericton (N.-B.)

Brian Eddy, SCF, Centre de foresterie de l'Atlantique,
Fredericton (N.-B.)

Kendra Isaac, Alberta Environment and Sustainable Resource
Development

Dieter Kuhnke, SCF, Centre de foresterie du Nord, Edmonton
(Alb.)

Bonita McFarlane, SCF, Centre de foresterie du Nord,
Edmonton (Alb.)

Tim Williamson, SCF, Centre de foresterie du Nord, Edmonton
(Alb.)

ANNEXE 3. PARTICIPANTS À L'ATELIER

- Rene Alfaro**, SCF, Centre de foresterie du Pacifique, Victoria (C.-B.)
- Bill Anderson**, SCF, Centre de foresterie de l'Atlantique, Fredericton (N.-B.)
- Christiane Arsenault**, SCF, Ottawa (Ont.)
- Ken Baldwin**, SCF, Centre de foresterie des Grands Lacs, Sault Ste. Marie (Ont.)
- Fred Beall**, SCF, Centre de foresterie des Grands Lacs, Sault Ste. Marie (Ont.)
- Tannis Beardmore**, SCF, Centre de foresterie de l'Atlantique, Fredericton (N.-B.)
- Jean Beaulieu**, SCF, Centre canadien sur la fibre de bois, Québec (QC)
- Elisa Becker**, SCF, Centre de foresterie du Pacifique, Victoria (C.-B.)
- Pierre Bernier**, SCF, Centre de foresterie des Laurentides, Québec (QC)
- Jagtar Bhatti**, SCF, Centre de foresterie du Nord, Edmonton (Alb.)
- Kathy Bleiker**, SCF, Centre de foresterie du Pacifique, Victoria (C.-B.)
- Yan Boulanger**, SCF, Centre de foresterie des Laurentides, Québec (QC)
- Alain Bourque**, Ouranos, Montréal (QC)
- Diana Boylen**, SCF, Centre de foresterie du Nord, Edmonton (Alb.)
- Suzanne Brais**, Université du Québec en Abitibi-Témiscamingue
- Roger Brett**, SCF, Centre de foresterie du Nord, Edmonton (Alb.)
- Jean-Noël Candau**, SCF, Centre de foresterie des Grands Lacs, Sault Ste. Marie (Ont.)
- Richard Carr**, SCF, Centre de foresterie du Nord, Edmonton (Alb.)
- Steve Colombo**, ministère des Richesses naturelles de l'Ontario
- Barry Cooke**, SCF, Centre de foresterie du Nord, Edmonton (Alb.)
- Dominic Cyr**, Institut des sciences de la forêt tempérée (QC)
- Phyllis Dale**, SCF, Ottawa (Ont.)
- Bill de Groot**, SCF, Centre de foresterie des Grands Lacs, Sault Ste. Marie (Ont.)
- Steve D'Eon**, SCF, Centre canadien sur la fibre de bois, Ottawa (Ont.)
- Pierre DesRochers**, SCF, Centre de foresterie des Laurentides, Québec (QC)
- Anne Dickinson**, retraitée
- Frédéric Doyon**, Institut des sciences de la forêt tempérée (QC)
- Brian Eddy**, SCF, Centre de foresterie de l'Atlantique, Fredericton (N.-B.)
- Jason Edwards**, SCF, Centre de foresterie du Nord, Edmonton (Alb.)
- Kate Edwards**, SCF, Centre de foresterie de l'Atlantique, Fredericton (N.-B.)
- Jeff Fera**, SCF, Centre canadien sur la fibre de bois, Sault Ste. Marie (Ont.)
- Michelle Filiatrault**, SCF, Centre de foresterie du Nord, Edmonton (Alb.)
- Rich Fleming**, SCF, Centre de foresterie des Grands Lacs, Sault Ste. Marie (Ont.)
- Mike Fullerton**, SCF, Ottawa (Ont.)
- Mike Gartrell**, SCF, Centre de foresterie du Nord, Edmonton (Alb.)
- Dave Gervais**, SCF, Centre de foresterie des Laurentides, Québec (QC)
- Asghedom Ghebremichael**, SCF, Centre de foresterie du Nord, Edmonton (Alb.)
- Kevin Gillis**, Mistik Management Ltd., Meadow Lake (Sask.)
- François Girard**, SCF, ministère des Ressources naturelles du Québec
- Martin Girardin**, SCF, Centre de foresterie des Laurentides, Québec (QC)
- Gretta Goodine**, SCF, Centre de foresterie de l'Atlantique, Fredericton (N.-B.)
- Paul Gray**, ministère des Richesses naturelles de l'Ontario
- Art Groot**, SCF, Centre canadien sur la fibre de bois, Sault Ste. Marie (Ont.)
- Darrell Harris**, SCF, Centre de foresterie de l'Atlantique, Fredericton (N.-B.)
- Brian Harvey**, Université du Québec en Abitibi-Témiscamingue
- Brad Hawkes**, SCF, Centre de foresterie du Pacifique, Victoria (C.-B.)
- Paul Hazlett**, SCF, Centre de foresterie des Grands Lacs, Sault Ste. Marie (Ont.)
- Christian Hébert**, SCF, Centre de foresterie des Laurentides, Québec (QC)
- David Hill**, SCF, Centre de foresterie du Pacifique, Victoria (C.-B.)
- Kelvin Hirsch**, SCF, Centre de foresterie du Nord, Edmonton (Alb.)
- Michael Hoepting**, SCF, Centre de foresterie des Grands Lacs, Sault Ste. Marie (Ont.)
- Steve Holmes**, SCF, Centre de foresterie des Grands Lacs, Sault Ste. Marie (Ont.)
- Trisha Hook**, SCF, Centre de foresterie du Nord, Edmonton (Alb.)
- Nathalie Isabel**, SCF, Centre de foresterie des Laurentides, Québec (QC)
- Mark Johnston**, Saskatchewan Research Council, Saskatoon (Sask.)
- Stan Kavalinas**, Alberta Sustainable Resource Development (Alb.)
- Barbara Kishchuk**, SCF, Ottawa (Ont.)
- Dave Kreutzweiser**, SCF, Centre de foresterie des Grands Lacs, Sault Ste. Marie (Ont.)
- Paul Lansbergen**, Association des produits forestiers du Canada, Ottawa (Ont.)
- Guy Larocque**, SCF, Centre de foresterie des Laurentides, Québec (QC)
- Mike Lavigne**, SCF, Centre de foresterie de l'Atlantique, Fredericton (N.-B.)
- Don Leckie**, SCF, Centre de foresterie du Pacifique, Victoria (C.-B.)

- Héloïse Le Goff**, Université Laval, Québec (QC)
- Joan Luther**, SCF, Centre de foresterie de l'Atlantique, Fredericton (N.-B.)
- Joanne MacDonald**, SCF, Centre de foresterie de l'Atlantique, Fredericton (N.-B.)
- Steen Magnussen**, SCF, Centre de foresterie du Pacifique, Victoria (C.-B.)
- Alec McBeath**, SCF, Centre de foresterie du Pacifique, Victoria (C.-B.)
- Ken McIlwrick**, SCF, Centre de foresterie des Grands Lacs, Sault Ste. Marie (Ont.)
- Eliot McIntire**, SCF, Centre de foresterie du Pacifique, Victoria (C.-B.)
- Dan McKenney**, SCF, Centre de foresterie des Grands Lacs, Sault Ste. Marie (Ont.)
- Catherine McNalty**, SCF, Centre de foresterie du Nord, Edmonton (Alb.)
- Donnie McPhee**, SCF, Centre de foresterie de l'Atlantique, Fredericton (N.-B.)
- Michael Michaelian**, SCF, Centre de foresterie du Nord, Edmonton (Alb.)
- Annie Montpetit**, Institut des sciences de la forêt tempérée (QC)
- Alex Mosseler**, SCF, Centre de foresterie de l'Atlantique, Fredericton (N.-B.)
- David Paré**, SCF, Centre de foresterie des Laurentides, Québec (QC)
- Jean-Lionel Payeur**, University of Bayreuth, Allemagne
- Cindy Pearce**, Mountain Labyrinths Resource Management Inc., Revelstoke (C.-B.)
- John Pedlar**, SCF, Centre de foresterie des Grands Lacs, Sault Ste. Marie (Ont.)
- Bruce Pendrel**, SCF, Centre de foresterie de l'Atlantique, Fredericton (N.-B.)
- John Pineau**, Institut forestier du Canada, Mattawa (Ont.)
- Brad Pinno**, SCF, Centre de foresterie du Nord, Edmonton (Alb.)
- Greg Pohl**, SCF, Centre de foresterie du Nord, Edmonton (Alb.)
- Dave Price**, SCF, Centre de foresterie du Nord, Edmonton (Alb.)
- Deepa Pureswaran**, SCF, Centre de foresterie des Laurentides, Québec (QC)
- Tod Ramsfield**, SCF, Centre de foresterie du Nord, Edmonton (Alb.)
- Vincent Roy**, SCF, Centre de foresterie des Laurentides, Québec (QC)
- Kishan Sambaraju**, SCF, Centre de foresterie des Laurentides, Québec (QC)
- Maureen Scott**, SCF, Centre de foresterie du Pacifique, Victoria (C.-B.)
- Armand Séguin**, SCF, Centre de foresterie des Laurentides, Québec (QC)
- Peter Silk**, SCF, Centre de foresterie de l'Atlantique, Fredericton (N.-B.)
- Dale Simpson**, SCF, Centre de foresterie de l'Atlantique, Fredericton (N.-B.)
- Greg Smith**, SCF, Centre de foresterie du Pacifique, Victoria (C.-B.)
- Alice Solyma**, SCF, Centre de foresterie du Pacifique, Victoria (C.-B.)
- Laura Stanton**, Silvicon Inc., Smithers (C.-B.)
- Jim Stewart**, SCF, Centre canadien sur la fibre de bois, Edmonton (Alb.)
- Rona Sturrock**, SCF, Centre de foresterie du Pacifique, Victoria (C.-B.)
- Philippe Tanguay**, SCF, Centre de foresterie des Laurentides, Québec (QC)
- Evelyne Thiffault**, SCF, Centre de foresterie des Laurentides, Québec (QC)
- Dean Thompson**, SCF, Centre de foresterie des Grands Lacs, Sault Ste. Marie (Ont.)
- Brian Titus**, SCF, Centre de foresterie du Pacifique, Victoria (C.-B.)
- Tony Trofymow**, SCF, Centre de foresterie du Pacifique, Victoria (C.-B.)
- Rik Van Bogaert**, SCF, Centre de foresterie des Laurentides, Québec (QC)
- Michael van Zyll de Jong**, Memorial University, Corner Brook (T.-N.-L.)
- Lisa Venier**, SCF, Centre de foresterie des Grands Lacs, Sault Ste. Marie (Ont.)
- Yonghe Wang**, SCF, Centre de foresterie du Nord, Edmonton (Alb.)
- Fiona Warren**, Ressources naturelles Canada, Ottawa (Ont.)
- Kara Webster**, SCF, Centre de foresterie des Grands Lacs, Sault Ste. Marie (Ont.)
- Tim Williamson**, SCF, Centre de foresterie du Nord, Edmonton (Alb.)
- Richard Winder**, SCF, Centre de foresterie du Pacifique, Victoria (C.-B.)
- Mike Wulder**, SCF, Centre de foresterie du Pacifique, Victoria (C.-B.)
- Xinbiao Zhu**, SCF, Centre de foresterie de l'Atlantique, Corner Brook (T.-N.-L.)

● ● ● ANNEXE 4. ABRÉVIATIONS ET ACRONYMES

AEE : Agence européenne pour l'environnement

ANUSPLIN : Australian National University Splines

BBS : Relevé des oiseaux nicheurs

BioSIM : Biosimulation

C : Carbone

CCNUCC : Convention-cadre des Nations Unies sur les changements climatiques

CDB : Convention sur la diversité biologique

ClimateWNA : Climate Western North America

CO₂ : Dioxyde de carbone

EC : Environnement Canada

ECOLEAP : Extended Collaboration to Link Ecophysiology and Forest Productivity

EPA : United States Environmental Protection Agency

FAO : Organisation des Nations Unies pour l'alimentation et l'agriculture

GIEC : Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat

IFM : Indice forêt météo

IFN : Inventaire forestier national

IHC : Indice d'humidité climatique

IHS : Indice d'humidité du sol

ISSP : Indice de sévérité de sécheresse de Palmer

IUFRO : Union internationale des instituts de recherches forestières

LANDIS : Landscape disturbance and succession (model)

LiDAR : Light detection and ranging

MONARCH : Modelling Natural Resource Responses to Climate Change

N : Azote

NASA : National Aeronautics and Space Administration

NASDAQ : National Association of Securities Dealers Automated Quotations

NEON : National Ecological Observatory Network

ONG : Organisation non gouvernementale

PEP : Placettes d'échantillonnage permanentes

PPB : Productivité primaire brute

PPN : Productivité primaire nette

PRISM : Planning Tool for Resource Integration, Synchronization, and Management

REDD+ : Programme de collaboration des Nations Unies sur la réduction des émissions liées au déboisement et à la dégradation des forêts dans les pays en développement ainsi que la conservation, la gestion durable des forêts et des réserves de carbone des forêts dans les pays en développement

SCF : Service canadien des forêts

SGM : Semi-Global Matching

USDA : United States Department of Agriculture

USFW : U.S. Fish & Wildlife Service

USGS : U.S. Geological Survey

